



TITLE:

正則化法の適用による逆問題・非適切問題の解の構成に対する数学解析と数値解析

AUTHOR(S):

磯, 祐介

CITATION:

磯, 祐介. 正則化法の適用による逆問題・非適切問題の解の構成に対する数学解析と数値解析. 2004

ISSUE DATE:

2004-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/84946>

RIGHT:

学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

正則化法の適用による逆問題・非適切問題の
解の構成に対する数学解析と数値解析

(課題番号：13440031)

平成13年度～平成15年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(1))研究成果報告書

平成16年3月

京 都 大 学 図 書



1040940601

附 属 図 書 館

研究代表者： 磯 祐介

(京都大学大学院情報学研究科)

正則化法の適用による逆問題・非適切問題の
解の構成に対する数学解析と数値解析

(課題番号：13440031)

平成13年度～平成15年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(1))研究成果報告書

平成16年3月

研究代表者： 磯 祐介

(京都大学大学院情報学研究科)

研究組織

- 研究代表者 : 磯 祐介 (京都大学 大学院情報学研究科 教授)
- 研究分担者 : 木上 淳 (京都大学 大学院情報学研究科 教授)
- 研究分担者 : 久保 雅義 (京都大学 大学院情報学研究科 講師)
- 研究分担者 : 若野 功 (京都大学 大学院情報学研究科 講師)
- 研究分担者 : 西田 孝明 (京都大学 大学院理学研究科 教授)
- 研究分担者 : 西村 直志 (京都大学 学術情報メディアセンター 教授)
- 研究分担者 : 中村 玄 (北海道大学 大学院理学研究科 教授)
- 研究分担者 : 山本 昌宏 (東京大学 大学院数理科学研究科 助教授)
- 研究分担者 : 木村 正人 (九州大学 大学院数理学研究院 助教授)
- 研究分担者 : 田沼 一実 (群馬大学 工学部 助教授)
- 研究分担者 : 大西 和榮 (茨城大学 理学部 教授)
- 研究分担者 : 今井 仁司 (徳島大学 工学部 教授)
- 研究分担者 : 登坂 宣好 (日本大学 生産工学部 教授)

海外共同研究者 : V. Romanov (Sobolev Inst. Math., Russia 研究室長 (平成13年~15年))

海外共同研究者 : 陳 宜良 (国立台湾大学 数学系 教授 (平成15年))

海外共同研究者 : A. L. Boukhgueim (Sobolev Inst. Math., Russia 研究室長 (平成13年~14年))

交付された研究経費

交付決定額（配分額）

（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合 計
平成13年度	6,100	0	6,100
平成14年度	4,100	0	4,100
平成15年度	4,500	0	4,500
総計	14,700	0	14,700

使用内訳

平成13年度
交付額
6,100,000
（内訳）

実使用額	設備備品費	消耗品費	国内旅費	外国旅費	謝金	その他	利息	計
6,100,459	1,104,645	1,068,755	1,173,584	896,250	1,788,683	68,542	459	6,100,459

平成14年度
交付額
4,100,000
（内訳）

実使用額	設備備品費	消耗品費	国内旅費	外国旅費	謝金	その他	利息	計
4,100,110	0	994,240	1,674,840	619,150	755,475	56,405	110	4,100,110

平成15年度
交付額
4,500,000
（内訳）

実使用額	設備備品費	消耗品費	国内旅費	外国旅費	謝金	その他	利息	計
4,500,016	1,023,960	1,594,534	663,630	469,744	573,990	174,142	16	4,500,016

研究成果の総括

本課題研究では「正則化法による数値解析」を広い意味で捉え、逆問題・非適切問題の解析手法の確立を目ざした幅広い視点からの研究を行い成果を得た。

逆問題は医用 CT や非破壊検査技術・ジオレーダー等の実用技術と関わる問題であり、その研究の進展は先端技術の革新と直結している。特に信頼できる数値解の構成は、実用上からも重要な課題となっている。その一方で、数学的には殆どの逆問題は Hadamard の意味での非適切 (ill-posed) であり、従来の数値解析手法の適用が困難であることが多い。大雑把な表現であるが、対象とする数理モデル (微分方程式) が安定な解を一意的にもつことが「適切 (well-posed)」の意味であるので、この否定概念の非適切問題の解析が困難であることは容易に想像されよう。

このような非適性を緩和する手法として、数学においては種々の「正則化法」が提案されている。これはパラメータを含む“正則化項”の導入によって非適切問題を適切な問題の系列で近似するもので、数値計算等においては正則化された問題を通常手法で離散化することとなる。Tikhonov 正則化法はその最も汎用的かつ有名な方法である。本課題研究は、この正則化法を中心に、幅広い視点から逆問題・非適切問題の解析に取り組み、多くの成果を上げた。

特筆すべき成果は、浮動小数点数値計算の基礎である IEEE754 方式による倍精度計算環境そのものの見直しを行ない、非適切問題の数値計算を念頭においた高速多倍長数値計算環境を設計・実装したことである。これは本課題研究の研究協力者の成果に負うものであるが、これによって Tikhonov 正則化法の正則化パラメータ選択に関する従来手法の問題点を指摘した。さらにこの計算環境を活かして非適切問題の高精度数値計算を行なうために、スペクトル法を基礎とするアルゴリズムを開発したことも大きな成果と言えよう。

さらに、Dirichlet-Neumann 写像の局所化や積分方程式の適用も含め、逆問題・非適切問題の解の再構成手法を数学・数値解析の視点から深化させ成果を挙げている。さらに、今後は非均質な媒体における逆問題解析が重要になると考え、その解析の基礎となるフラクタル領域での熱や波の伝播の基礎理論、多倍長数値計算環境における事後誤差解析としての精度保証数値解析など、これらのあらたな解析手法の確立のための基礎研究にも光を当て、将来を示唆する先駆的な成果を挙げることができた。

研究分担課題「多倍長数値計算環境の整備と正則化法による数値計算」

研究分担者： 京都大学大学院情報学研究科・教授、磯 祐介

研究協力者： 京都大学大学院情報学研究科・助手、藤原 宏志

研究内容と成果の概要

■ 高速な無限多倍長数値計算環境を設計実装し、この環境を利用した正則化法の離散化を含む数値計算を精密に行ない成果を得た。

■ 逆問題は、工学・医学・地球物理学に現れる重要な問題であるが、その殆んどはHadamardの意味で非適切 (ill-posed) であることが殆んどである。特に、解の存在を一般に数学解析から論じることが殆んど不可能であるが、問題の性質上、解の存在を仮定して論じられることが多い：応用逆問題を扱う限り、解としての「現象」の存在を仮定するため、研究対象は解の一意性と安定性そしてその再構成が主眼となる。

■ これまでの研究では、解の再構成手法としてもその厳密解を閉じた形式 (formula) で書き下すことは困難な場合が多く、通常は数値計算によってその近似解を構成する手段が採られることが多い。しかし問題の非適切性から、直接離散化による離散化スキームは数値的な不安定性 (ill-conditioned) を引き起こすことが殆んどであり、仮りに解を表示する公式があったとしてもそれを信頼性を持って数値的に扱うことは通常手法では極めて困難である。すなわち、数値的に不安定な計算スキームを用いた数値計算では、通常の倍精度・浮動小数点方式による数値計算では丸め誤差の急速な増大により数値計算が破綻し、意味のある数値計算を行なうことは殆んど不可能となる。このため、「正則化法」によるパラメータの導入によって問題を安定な問題の系列で置き換え、この安定な方程式を離散化して得られるスキームを通常手法で数値計算を行なうことが、広く行なわれている。しかしこのような手法では数値解の近似度を上げることは叶わず、逆問題・非適切問題における高精度解法の提案が待たれていた。このような状況で、本分担研究では無限多倍長数値計算環境の提供を一つの回答と考え、研究を行なった。

■ 本研究で行なった無限多倍長数値計算環境のアイデアは、計算を破綻させる丸め誤差を「多倍長数値計算 (Multiple-precision)」として有効桁数を十分に確保することで丸め誤差を隠蔽し、仮想的に丸め誤差のない数値計算を実現しようとするものである。より正確には、有効桁数を任意に設定し得る環境を用いることで、丸め誤差の大きさを任意に小さくし、仮想的に丸め誤差が排除された数値計算環境では数値的に不安定なスキームを用いた数値計算も実現可能な有効な手段となり得ることを示した。

■ 研究の遂行にあたっては、高速な無限多倍長数値計算環境の設計と実装がその端緒であり、この成果は研究協力者の藤原に負うものである。ここではこの環境をソフトウェアの形で実現しており、設計したソフトウェアは 64 ビット RISC アーキテクチャの一つである Alpha アーキテクチャ、および 32 ビット・パーソナル・コンピュータ用に普及している IA32 アーキテクチャで動作している。現在までに、四則演算、組み込み関数などを実装しており、科学技術計算を行うには十分な機能を有している。このソフトウェアはネットワークを介して広く公開されている (<http://www-an.acs.i.kyoto-u.ac.jp/~fujiwara/exflib>)。

数値実験面では、構築した高速な無限多倍長数値計算環境を活用し、Cauchy-Riemann 方程式の初期値問題、第一種積分方程式の直接離散化などの典型的な非適切問題の数値計算を行い、厳密解を十分近似する数値解を極めて短時間で得るに至った。これらはいずれも、通常の計算環境では数値解の構成が不可能とされてきた問題であった。ここで注意すべきことは、非適切問題の数値計算では、丸め誤差と同様に打ち切り誤差を初めとする離散化誤差の評価も重要である。本研究では第一種積分方程式の数値解析を目標に、研究分担者の徳島大学の今井仁司教授の提案するスペクトル選点法をもとに高精度数値積分公式も導出し、無限多倍長数値計算向の離散化法についての注意も与えた。これは被積分関数が解析的な場合に、離散化誤差が分割数に応じて指数的に減衰するものである。この離散化法と無限多倍長多倍長計算の組み合わせにより、第一種積分方程式に現れる積分作用素の数値特異値分解に成功した。これは過去に K. Atkinson, S. G. Mikhlin らによる研究を発展させたもので、コンパクト作用素の関数方程式の数値計算法に対して新たな知見を与えるものと考えられる。これらの成果は、今後のコンピュータ・トモグラフィ(CT)一層の進展など、逆問題と関わる第一種積分方程式の数値計算の高精度化を示唆するものであり、応用面からもその研究発展が期待される課題である。

一方、Tikhonov 正則化法の離散化の研究においては、従来広く利用されてきた正則化パラメータ選択に関する P.C. Hansen の L-curve 法の誤りを指摘した。この方法は、残差を指標に正則化パラメータの選択を考慮するものであるが、計算を実行する数値計算環境にパラメータ選択が深く依存することを実例で示し、従来研究の枠組みの問題点を指摘している。

一方、多倍長精度によって数値的に不安定な問題に対する数値計算が成功したとはいえ、丸め誤差の問題が本質的に解消されているわけではない。これらの数値計算の信頼性を保証するためには丸め誤差に対する評価が必要となる。丸め誤差は数値計算にもちいた計算機プログラムに深く依存するため、数学解析の手法で事前に定量的な評価を与えるのは極めて困難である。そこで本研究では多倍長精度・区間演算により、事後誤差解析による評価手法の提案を行ない、いくつかのテスト問題に対して極めて有力な手法になることを示唆するアイデアを提案した。この手法は非適切問題の数値計算に対する有力な信頼性評価手法になると考えており、今後の益々の研究が必要なテーマと判断している。

論文

- [1] FUJIWARA Hiroshi, ISO Yuusuke,
Numerical Challenge to Ill-posed Problems by Fast Multiple-precision System
Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 50 (2001) pp.419-424.
- [2] Yuusuke Iso, Hiroshi Fujiwara, Kimihiro Saito
Numerical computations for ill-conditioned problems by multiple-precision systems,
Mathematical Modeling and Numerical Simulation in Continuum Mechanics (2002)
pp.185-194.
- [3] 藤原宏志, 磯祐介,

- 「64bit 計算機への多倍長計算環境の実装」,
日本計算数理工学会論文集 第2巻 (2002) pp.31-34.
- [4] 磯祐介, 藤原宏志,
「多倍長計算による非適切問題の数値解析」,
日本計算数理工学会論文集 第2巻 (2002) pp.35-38.
- [5] Hiroshi FUJIWARA, Yuusuke ISO,
Some Remarks on the Choice of Regularization Parameters under Multiple-Precision Arithmetic,
Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 51 (2002) pp.387-393.
- [6] 藤原宏志, 磯祐介,
「64bit 計算環境に適した多倍長数値計算環境の構築と非適切問題の数値計算」,
情報処理学会論文誌 44巻3号 (2003) pp.925-931.
- [7] Hiroshi Fujiwara, *Numerical Method for Integral Equation of the First Kind under Multiple-Precision Arithmetic*,
Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 52 (2003) pp.193-203.

論文 (査読なし)

- [1] 藤原宏志,
「多倍長数値計算環境下での Tikhonov 正則化法について」,
月刊「地球」, 272号 (2002) pp.146-152.

口頭発表

- [1] Yuusuke Iso
“Applications of the Fast Multiple-Precision System to Numerical Analysis of Ill-posed Problems”
Workshop'2001 on the Inverse Problems, ロシア科学アカデミー St. Petersburg 支部 Euler Institute (2001年6月)
- [2] Hiroshi Fujiwara
“Multiple-Precision Arithmetic for the Ill-posed Problems”
International Conference on Inverse Problems and Numerics, City University of Hong Kong (2002年1月) (招待講演)
- [3] 藤原宏志, 磯祐介,
「多倍長計算環境下での L-curve 法の適用に関する注意」,
第51回理論応用力学講演会, 日本学術会議場 (2002年1月)

- [4] 藤原 宏志,
「多倍長計算による正則化法の高精度計算」,
共同研究集会「逆問題の諸相」, 京都大学数理解析研究所 (2002 年 10 月)
- [5] Hiroshi Fujiwara,
"Application of multiple precision arithmetic to ill-posed problem",
台湾科学院特別講演会 (Academia Sinica, Taiwan(2002 年 12 月))
- [6] Yuusuke Iso,
"A remark on the Tikhonov regularization method on multiple-precision arithmetic"
第 1 回日本-台湾逆問題・非適切問題研究集会 (台湾大学 2002 年 12 月)
- [7] FUJIWARA Hiroshi,
"Application of Multiple-Precision Arithmetic to Numerically Unstable Problems"
第 1 回日本-台湾逆問題・非適切問題研究集会 (台湾大学 2002 年 12 月)
- [8] 藤原宏志,
「多倍長数値計算環境下での逆問題・非適切問題の数値解法の確立」,
第 52 回理論応用力学講演会, 日本学術会議場 (2003 年 1 月)
- [9] 藤原宏志,
「多倍長数値計算への区間演算の実装」,
第 8 回 阿波ワークショップ, 徳島大学 (2003 年 8 月)
- [10] 藤原宏志,
「多倍長・区間演算による非適切問題の数値解析」,
京都大学数理解析研究所 共同研究集会「逆問題の諸相」(2003 年 10 月)
- [11] 藤原宏志,
「多倍長計算環境の設計と非適切問題への適用」,
第 4 回「制御と数学」研究集会, 京都大学 (2003 年 10 月)
- [12] Hiroshi FUJIWARA,
"Application of Multiple-Precision Interval Arithmetic for Ill-Posed Problems"
ワークショップ「逆問題の数学解析と数値解法」, 東京大学 (2004 年 1 月)
- [13] 藤原宏志,
「Picard の公式による第一種積分方程式の解の数値的構成法」,
第 53 回理論応用力学講演会, 日本学術会議場 (2004 年 1 月)
- [14] 藤原宏志,
多倍長計算を用いた積分作用素の数値特異値分解の高速化」,
第 53 回理論応用力学講演会, 日本学術会議場 (2004 年 1 月)

研究分担課題「多倍長数値計算環境における計算手法の確立」

研究分担者： 徳島大学工学部・教授、今井 仁司

研究協力者： 徳島大学工学部・教授、竹内 敏己

研究協力者： 徳島大学工学部・助手、坂口 秀雄

研究内容と成果の概要

本分担課題では、多倍長計算環境において、正則化法の離散化もふくめた幅広い数値計算法の開発と提案を行い成果を得た。

多倍長計算と任意次数近似を容易に実現する離散化手法を組み合わせることにより、数値誤差(打ち切り誤差と丸め誤差)を任意に小さくできる数値計算が可能になる。この数値手法を我々は「無限精度数値シミュレーション」と呼んだ。逆問題は医学・工学などの実用問題によく現れるのでその解析は非常に重要であるが、誤差に非常に敏感なため通常手法での数値解析は非常に困難となる。そこで数値誤差を任意に小さくできる無限精度数値シミュレーションの適用を考慮し、その適用可能性とその問題点の精査を主眼に研究を行なった。その具体的な研究成果は、以下の3点にまとめられる。

1. 無限精度数値シミュレーションによる新たな研究分野の開拓

正則化を行えば逆問題等の Hadamarad の意味での非適切問題の数値計算は可能になるといわれてきた。確かに正則化項が大きければ通常の倍精度数値計算環境においても、その数値計算は可能である。しかしながらこれでは厳密解を十分に再現する数値解は得られない。一方で数値解を厳密解に近づけようと正則化項を小さくすると、数値的不安定によって数値計算は破綻する。分担者は数値実験の積み重ねにより、正則化の離散化の単純適用では厳密解を想像させるような有益な数値解が得られる保証が無いのではないかと結論に達した。

そこで、正則化を伴わない直接数値計算を無限精度数値シミュレーションで試みた。その結果、第一種積分方程式の直接数値計算を初めて成功させるなど、数々の輝かしい成果が得られた。これらの成功によって、逆問題等の非適切問題を数値的に解析する一つの道筋がつけられたものと考えている。現実には、第一種積分方程式の問題では、数学的にも興味深い事実が数値シミュレーションによって明らかとなった。

2. 並列計算による大規模シミュレーションの実現

無限精度数値シミュレーションは多倍長演算を用いるので、一般には膨大な計算時間と巨大なメモリ空間を要求する。したがって、単体の CPU でその計算を実行することは実用的でないと考え、高性能計算機を高速ネットワーク接続した計算機クラスターによる並列計算に取り組んだ。ここで用いたクラスターは、10CPU-20GBメモリ空間を有する大規模なもので、ギガビットの高速ネットワークで接続されている。並列計算を行うために並列計算用のライブラリである PVM や MPI をインストールし、多倍長演算のライブラリを利用しているプログラムを並列計算用に書き換えてシミュレーションを実行した。この結果、使用メモリが 18GB を超えるような巨大シミュレーションが実行され、また非常に

高い並列度が確認され、大きな成果を得た。ここで用いられた計算機環境は現在ではまだ広く普及しているものではないが、近年の計算機の発達速度を考えると、数年後にはこの程度の計算環境が研究の現場で容易に構築できるものと判断している。この観点からも、今回の研究による成果は今後の数値シミュレーションのあり方を示唆する重要なものと考えている。

3. 補足

工学・医学の現場では、現実の対象の構造から円・球あるいはそれと微分同相な領域で扱われる逆問題が非常に数多い。このような問題を行うには、方程式を極座標変換することが有用である。ところが、極座標変換によって微分方程式に形式的には特異性が表れるが、この特異性を回避する方法を本分担研究を通して提案してる。ここで提案する公式は一般的な数学的公式として利用可能なものであり、無限精度数値シミュレーションに限らず通常数値計算環境における差分法等においても利用可能である。この研究は今後各方面に甚大な影響を与えるものと思われる。その他、領域分割法による無限精度数値シミュレーションの効率化や等高点追跡手法の開発など、様々な数値解法の開発や様々な非線形問題の数値解析を分担課題と関連して行なった。

論文

- [1] Shewli Shamim Shanta, Toshiki Takeuchi, Hitoshi Imai and Masahiro Kushida,
NUMERICAL COMPUTATION OF ATTRACTORS IN FREE BOUNDARY PROBLEMS.
Advances in Mathematical Sciences and Applications, Vol. 11, pp. 531–548, 2001.
- [2] Hitoshi Imai, Koji Kikuchi, Kazuaki Nakane, Seiro Omata and Tomomi Tachikawa,
A Numerical Approach to the Asymptotic Behavior of Solutions of a One-Dimensional Free Boundary Problem of Hyperbolic Type, Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol. 18, pp. 43–58, 2001.
- [3] Hitoshi Imai, Toshiki Takeuchi, Shewli Shamim Shanta, Naoyuki Ishimura and Toyohiko Aiki,
Numerical computation of Lyapunov exponents related to attractors in a free boundary problem,
Nonlinear Analysis, 47, pp. 3823–3833, 2001.
- [4] 石村 直之, 今井 仁司, 竹内 敏己,
「自由境界問題の数値解法 - 数理ファイナンスへの応用 -」,
一橋論叢, Vol. 126, pp. 419–428, 2001.
- [5] Hitoshi Imai and Toshiki Takeuchi,
SOME ADVANCED APPLICATIONS OF THE SPECTRAL COLLOCATION METHOD,

- GAKUTO International Series, Mathematical Sciences and Applications, Vol. 17, pp. 323–335, 2001.
- [6] Toshiki TAKEUCHI, Naoyuki ISHIMURA and Hitoshi IMAI,
A New Numerical Technique for the Option Pricing Problem of American Type,
 ‘World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics Proceedings (Eds., Nagib Callaos, Yunfa Hu, Manuel Rodriguez and Quang Ha)’, The International Institute of Informatics and Systemics, Vol. II, pp. 233–236, 2001.
 - [7] Toyohiko Aiki, Hitoshi Imai, Naoyuki Ishimura and Yoshio Yamada,
Well-posedness of one-phase Stefan problems for sublinear heat equations,
 Nonlinear Analysis, 51, pp. 587–606, 2002.
 - [8] Hitoshi Imai, Hideo Sakaguchi and Toshiki Takeuchi,
Parallel computing in infinite precision numerical simulation for PDE systems.
 PROCEEDINGS OF FIFTH CHINA-JAPAN SEMINAR ON NUMERICAL MATHEMATICS(Eds. Zhong-Ci Shi and Hideo Kawarada), pp. 141–146, Science Press, Beijing, 2002.
 - [9] C.-H. Jin, S.-L. Zhang and H. Imai,
A CGS-like method for solving nonsymmetric linear systems,
 PROCEEDINGS OF FIFTH CHINA-JAPAN SEMINAR ON NUMERICAL MATHEMATICS(Eds. Zhong-Ci Shi and Hideo Kawarada), pp. 147–153, Science Press, Beijing, 2002.
 - [10] Toshiki Takeuchi and Hitoshi Imai,
DIRECT NUMERICAL SIMULATIONS OF CAUCHY PROBLEMS FOR THE LAPLACE OPERATORS,
 Advances in Mathematical Sciences and Applications, Vol. 13, pp. 587–609, 2003.
 - [11] 今井 仁司,
 「応用解析における多倍長計算」,
 数学, 日本数学会編集, 岩波書店, Vol. 55, pp. 316–325, 2003.
 - [12] H. IMAI and T. TAKEUCHI,
 DIRECT SIMULATION OF AN INTEGRAL EQUATION OF THE FIRST KIND,
 Proceedings of International Conference on Inverse Problems -Recent Developments in Theories & Numerics(Eds. Yiu-Chung Hon, Masahiro Yamamoto, Jin Cheng, June-Yub Lee), pp. 247–254, World Scientific, Singapore, 2003.
 - [13] T. HANADA, H. IMAI, N. ISHIMURA and M.A. NAKAMURA,
EGUCHI-OKI-MATSUMURA EQUATION FOR PHASE SEPARATION: NUMERICALLY GUIDED APPROACH,

Proceedings of International Conference on Inverse Problems -Recent Developments in Theories & Numerics(Eds. Yiu-Chung Hon, Masahiro Yamamoto, Jin Cheng, June-Yub Lee), pp. 433-442, World Scientific, Singapore, 2003.

- [14] Hideo Sakaguchi and Hitoshi Imai,
A numerical method for tracking the level set in one-dimensional problems,
GAKUTO International Series, Mathematical Sciences and Applications, to appear.

論文 (査読なし)

- [1] Toshiki TAKEUCHI, Hideo SAKAGUCHI, Cheng-Hai JIN and Hitoshi IMAI,
On numerical methods for solving linear systems appearing in Infinite Precision Numerical Simulation,
京都大学数理解析研究所講究録, 京都大学, 1198, pp. 154-160, 2001.
- [2] Hitoshi IMAI and Toshiki TAKEUCHI,
On numerical methods for analysis of chaotic phenomena in free boundary problems,
京都大学数理解析研究所講究録, 京都大学, 1210, pp. 115-128, 2001.
- [3] Hitoshi IMAI, Toshiki TAKEUCHI, Hideo SAKAGUCHI and Tetsuya HISHINUMA,
On Super Numerical Simulation,
京都大学数理解析研究所講究録, 京都大学, 1265, pp. 9-17, 2002.
- [4] Toshiki TAKEUCHI and Hitoshi IMAI,
Domain Decomposition Method and Infinite-Precision Numerical Simulation,
京都大学数理解析研究所講究録, 京都大学, 1288, pp. 102-107, 2002.
- [5] 今井 仁司, 竹内 敏己, 磯 祐介, 藤原 宏志,
Methods for an integral equation of the first kind,
第 51 回理論応用力学講演会講演論文集, pp. 589-590, 2002.
- [6] 今井 仁司, 竹内 敏己, 坂口 秀雄,
「楕円型作用素のコーシー問題に対する無限精度数値シミュレーション」,
第 52 回理論応用力学講演会講演論文集, pp. 195-196, 2003.
- [7] 竹内 敏己, 今井 仁司, 磯 祐介,
「熱伝導方程式に関する逆問題の無限精度並列数値シミュレーション」,
第 52 回理論応用力学講演会講演論文集, pp.197-198, 2003.
- [8] 竹内 敏己, 石村 直之, 今井 仁司,
「アメリカンオプションの厳密な評価と自由境界問題-Exact American option pricing and the free boundary problem-」,
第 52 回理論応用力学講演会講演論文集, pp.501-502, 2003.

- [9] 今井 仁司, 竹内 敏己,
「熱伝導方程式の逆問題に対するいくつかの数値実験」,
第 53 回理論応用力学講演会講演論文集, pp.309-310, 2004.
- [10] 竹内 敏己, 今井 仁司, 坂口 秀雄,
「Laplace 作用素の Cauchy 問題における数値誤差の影響について」,
第 53 回理論応用力学講演会講演論文集, pp.311-312, 2004.
- [11] 坂口 秀雄, 今井 仁司,
「等高点追跡の無限精度数値計算法の提案とその並列計算」,
第 53 回理論応用力学講演会講演論文集, pp.405-406, 2004.
- [12] 今井 仁司,
「極座標変換に伴う微分方程式の特異性の回避公式について」,
京都大学数理解析研究所講究録, 京都大学, 1362, pp.161-168, 2004.

口頭発表

- [1] 今井 仁司, 竹内 敏己, 磯 祐介, 藤原 宏志,
「第 1 種積分方程式の無限精度数値計算」,
日本数学会応用数学分科会講演 (九州大学 (2001.10.6))
- [2] 菱沼 哲也, 坂口 秀雄, 今井 仁司, 竹内 敏己, 金 成海,
「可視化における任意拡大」,
日本応用数理学会 2001 年度年会 (九州大学 (2001.10.7))
- [3] 坂口 秀雄, 今井 仁司, 三村 昌泰,
「あるパターンを区別する指標について」,
応用数学合同研究集会 (龍谷大学 (2001.12.20))
- [4] 今井 仁司, 竹内 敏己, 磯 祐介, 藤原 宏志,
「第 1 種積分方程式の無限精度数値シミュレーション」,
応用数学合同研究集会 (龍谷大学 (2001.12.21))
- [5] NAOYUKI ISHIMURA, TOSHIKI TAKEUCHI, AND HOTOSHI IMAI,
“EXACT PRICING FORMULAS FOR THE AMERICAN OPTIONS”,
JAFEE 2002 夏季大会 (法政大学 (2002.6.15))
- [6] 石村 直之, 竹内 敏己, 今井 仁司,
「アメリカンプットオプションのある解析方法について」,
日本応用数理学会 2002 年度年会 (慶應義塾大学 (2002.9))
- [7] 竹内 敏己, 坂口 秀雄, 金 成海, 今井 仁司,
「DDM を IPNS にしたときに現れる連立一次方程式と反復法について」,
日本応用数理学会 2002 年度年会 (慶應義塾大学 (2002.9))

- [8] 坂口 秀雄, 竹内 敏己, 今井 仁司,
「無限精度シミュレーションにおける並列計算に関するある注意点」,
日本応用数理学会 2002 年度年会 (慶應義塾大学 (2002.9))
- [9] 菱沼 哲也, 坂口 秀雄, 竹内 敏己, 今井 仁司,
「摂動系の可視化における任意拡大」,
日本応用数理学会 2002 年度年会 (慶應義塾大学 (2002.9))
- [10] 今井 仁司, 竹内 敏己,
「解を持たない楕円型方程式の初期値問題の数値計算について」,
日本数学会応用数学科会 (島根大学 (2002.9.28))
- [11] 竹内 敏己, 今井 仁司,
「ラプラス作用素の Cauchy 問題の無限精度シミュレーション」,
応用数学合同研究集会 (龍谷大学 (2002.12.19))
- [12] 今井 仁司, 坂口 秀雄,
「発展方程式の解の等高点追跡手法」,
第 32 回数値解析シンポジウム (箱根小涌園 (2003.5.21))
- [13] 竹内 敏己, 今井 仁司, 藤原 宏志, 磯 祐介,
「第一種積分方程式の様々な無限精度数値計算」,
日本応用数理学会 2003 年度年会 (京都大学 (2003.9))
- [14] 坂口 秀雄, 今井 仁司,
「等高点追跡の無限精度数値計算」,
日本応用数理学会 2003 年度年会 (京都大学 (2003.9))
- [15] 今井 仁司, 竹内 敏己,
「ラプラス作用素の Cauchy 問題に対する領域分割による無限精度数値計算」,
日本数学会応用数学科会 (千葉大学 (2003.9.26))
- [16] 今井 仁司, 竹内 敏己,
「円領域の偏微分方程式に対する無限精度数値シミュレーション」,
応用数学合同研究集会 (龍谷大学 (2003.12.18))
- [17] 坂口 秀雄, 今井 仁司,
「無限精度数値計算法を用いた等高点追跡手法について」,
応用数学合同研究集会 (龍谷大学 (2003.12.18))

研究分担課題「正則化法を利用した逆問題の数値計算法」

研究分担者： 茨城大学理学部・教授、大西 和榮

研究協力者： 茨城大学理学部・助手、代田 健二

研究内容と成果の概要

数値物理や工学に現れる典型的な逆問題に対し、正則化法による数値計算と無限多倍長による数値計算の両面から取り組み、成果を挙げた。

数学的な視点では、境界観測の逆問題の設定においては境界において過不足なく観測される物理量をもとに領域内の物理量を一意かつ安定に定めることが、自然な設定である。しかし応用の立場では観測等の事情から観測値に過不足が生じることが避けられず、境界における観測に過不足をきたした場合に領域内の物理量をいかに定めるべきかを考察する必要がある。このような問題に対し、典型的な逆問題に対して偏微分方程式論をベースとする研究を行なった。本分担研究においては、一般に偏微分方程式の順問題・逆問題に対し、数学的な意味では「普通では解けない」設定や余計な情報を含む問題(過剰決定系)を数値計算の視点から扱った。ここでは一意可解でない問題を、正則化法などを通して安定に解ける問題の系列で置き換え、この問題に対する数値計算法を考察した。

1. 内点観測を伴うラプラス方程式の境界値逆問題

2次元直交座標平面 R^2 内の閉じた曲線 Γ で囲まれた領域を Ω とする。点 $x = (x_1, x_2)$ における何らかの物理量 $u(x)$ を考える。曲線 Γ の一部の弧 Γ_u において $u(x)$ の値が $u = \bar{u}$ であると分かっているとする。さらに、領域内部の n 個の点 $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}$ において u の値が $u(x^{(k)}) = \bar{u}^{(k)}$ ($k = 1, 2, \dots, n$) であると分かっているとする。このとき、これら既知の値をとり、領域 Ω 内においてラプラス方程式を満たす $u(x)$ を Ω の閉包 $\bar{\Omega} = \Omega \cup \Gamma$ 全体で求める。このような関数 $u(x)$ が果たして存在するかどうかは問わないことにする。我々は、解の再構成の視点に立ち、このような関数が初めから存在するものとして議論を進める。

関数 $u(x)$ を求めるために、曲線 Γ 全体に関して Γ_u の残りの弧 $\Gamma_u^c = \Gamma \setminus \Gamma_u$ の上で u の値 ω を適当に仮定し、境界値問題: $-\Delta u(x; \omega) = 0$ ($x \in \Omega$), $u|_{\Gamma_u} = \bar{u}$ かつ $u|_{\Gamma_u^c} = \omega$ を満たす解 $u(x; \omega)$ のうちで、内点における値の平方和で作られる汎関数 $J(\omega) = \sum_{k=1}^n |u(x^{(k)}; \omega) - \bar{u}^{(k)}|^2$ が最小となる境界値 ω を同定することにした。

2. 境界上での観測を伴うラプラス方程式の境界値逆問題

境界 Γ 上でのみ観測される境界値逆問題を考察した。領域 Ω の境界 Γ の一部の弧 Γ_u 上で、未知関数 $u(x)$ の値が $u|_{\Gamma_u} = \bar{u}$ と観測され、さらに、 Γ の一部の弧 Γ_q 上で外向き単位法線 n 方向の傾きが $\frac{\partial u}{\partial n}|_{\Gamma_q} = \bar{q}$ と観測されているとする。このとき、ラプラス方程式を満たす関数 $u(x)$ を閉包 $\bar{\Omega}$ において求めることが我々の問題である。境界 Γ 全体に対する Γ_u の残りの部分を Γ_u^c とおく。また、 $\Gamma_q^c = \Gamma \setminus \Gamma_q$ とおく。2つの観測境界 Γ_u と Γ_q との位置関係により、この境界値逆問題は従来から良く知られた問題に帰着される。すなわち、 $\Gamma_u \cup \Gamma_q = \Gamma$ かつ $\Gamma_u \cap \Gamma_q = \phi$ (空集合) のとき、この問題は伝統的な混合境界値問

題となる. $\Gamma_u = \Gamma_q$ のとき, 伝統的なコーシー問題となる. $\Gamma \neq \Gamma_q$ かつ $\Gamma_u \cap \Gamma_q \neq \emptyset$ のときには, 過剰決定系の問題, そうでなければ不足決定系 (劣決定系) の問題となる.

数値計算に当たっては, 弧 Γ_u^c 上の $u(\mathbf{x})$ の値を仮りに $\omega(\mathbf{x})$ とおき, 汎関数 $J(\omega) = \int_{\Gamma_q} |q(\mathbf{x}; \omega) - \bar{q}(\mathbf{x})|^2 d\Gamma$ が最小となるような $\omega|_{\Gamma_u^c}$ を随伴変分法を用いて求めた.

論文

- [1] Q. Wang and K. Onishi,
Numerical reconstruction of internal states by boundary measurements for the Laplace equation,
International Journal of Numerical Functional Analysis and Optimization, Vol.22,
pp.441-453 (2001).
- [2] K. Onishi and Y. Ohura,
Direct adjoint method for invere boundary value problem of the Laplace equation,
Theoretical and Applied Mechanics, Vol.50, pp.425-433 (2001).
- [3] K. Onishi and Y. Ohura,
Direct method for solution of inverse boundary value problems of the Laplace equation,
in M. Tanaka and G. S. Dulikravich (Eds.); Inverse Problems in Engineering Mechanics III, pp.219-226, Elsevier Science Ltd., Amsterdam (2002).
- [4] Y. Ohura, Q. Wang, and K. Onishi,
On identifying Dirichlet condition for under-determined problem of the Laplace equation by BEM,
International Journal of Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.26,
pp.87-93 (2002).
- [5] K. Hayashi, Y. Ohura, and K. Onishi,
Direct method of solution for general boundary value problem of the Laplace equation,
Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.26, pp.763-771 (2002).
- [6] K. Shiota, S. Murakami, Y. Ohura, K. Onishi and K. Yasuhara,
Identification of underground hydraulic transmissivity by the variational method from interior measurement of hydraulic heads,
Theoretical and Applied Mechanics, Vol.51, pp.395-400 (2002).
- [7] K. Hayashi, K. Onishi, and Y. Ohura,
Direct numerical identification of boundary values in the Laplace equation,
Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol.152, pp.161-174 (2003).

- [8] K. Iijima, K. Shiota, and K. Onishi,
A numerical computation for inverse boundary value problems by using the adjoint method,
Contemporary Mathematics, H. Isozaki (Ed.); Inverse Problems and Spectral Theory, American Mathematical Society, Vol.348 (2003).
- [9] K. Shiota and K. Onishi,
Adjoint method for numerical solution of inverse boundary value and coefficient identification problems,
accepted in Survey on Mathematics in Industries, Springer-Verlag (2003).
- [10] K. Iijima, Y. Ohura and K. Onishi,
Numerical identification of a source location in steady heat conduction,
Advanced Computational Methods in Heat Transfer VIII (Eds., B. Sundén, C.A. Brebbia and A.C.Mendes), WIT Press, pp.359-370 (2004)

論文 (査読なし)

- [1] 大浦洋子, 大西和榮,
「ラプラス方程式の境界値逆問題に対する随伴型数値解法 (Adjoint numerical method for inverse boundary value problems of the Laplace equation)」.
第 6 回日本計算工学会講演会 講演論文集 4-12-4 (Proceedings of Computational Engineering Conference, JSCES, Vol.6, pp.1-4), 法政大学ポアソナードタワー, 東京 (2001.5.30-6.1).
- [2] K. Onishi and Y. Ohura,
Adjoint method for inverse boundary value problem of heat conduction,
in Computational Mechanics – New Frontiers for New Millennium (Eds.; S. Valliappan and N. Khalili), Proceedings of the First Asian – Pacific Congress on Computational Mechanics, Sydney, pp.1095-1100, Elsevier Science Ltd., Amsterdam (2001.11.20-23).
- [3] K. Onishi, K. Yasuhara, S. Murakami, Y. Ohura, and K. Iijima,
Identification of aquifer transmissivity from interior point observation,
Proceedings of the 4th International Conference on Inverse Problems in Engineering; Theory and Practice, May 26-31, Rio de Janeiro, Brazil, Vol.I, pp.349-356 (2002.5. 26-31).
- [4] K. Iijima, K. Hayashi, and K. Onishi,
The numerical solution of the backward heat conduction equation using arbitrary precision arithmetic,
Proceedings of the 4th International Conference on Inverse Problems in Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, Vol.II, pp.291-296 (2002.5. 26-31).

- [5] K. Hayashi and K. Onishi,
Alternating direction method for the external Helmholtz equation (Keynote address),
Boundary Elements XXIV, The 24th World Conference on Boundary Element Methods, 17-19 June 2002, Sintra, Portugal, pp.529-538 (2002.6.17-19).
- [6] K. Iijima and K. Onishi,
Lattice-free finite difference method for numerical solution of inverse heat conduction problem,
8 pages in CD ipdo-060 on Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Rio de Janeiro, Brazil, 2004, Book of Abstracts, p.97 (2004.3.17-19).
- [7] K. Iijima and K. Onishi,
Lattice-free finite difference method for backward heat conduction problems (Invited),
Advanced Computational Methods in Heat Transfer VIII (Eds., B. Sundén, C.A. Brebbia and A.C.Mendes), WIT Press, Eighth International Conference on Advanced Computational Methods in Heat Transfer, 24-26 March 2004, Carcavelos, Lisbon, Portugal, pp.3-14 (2004.3.24-26).

著書

- [1] C. W. グロエッチュ(著), 大西和榮, 田沼一実, 山本昌宏 (訳); はじめての逆問題. サイエンス社 (2002.6).
- [2] 登坂宣好, 大西和榮; 偏微分方程式の数値シミュレーション 第2版. 東京大学出版会 (2003.4).

口頭発表

- [1] K. Onishi and Y. Ohura,
“Numerical method for inverse boundary value problem of the Laplace equation”,
International Conference on Recent Advances in Computational Mathematics, October 10th-13th, Hotel JAL City Matsuyama, Abstracts of Talks, pp.104-105 (2001).
- [2] K. Onishi and Y. Ohura,
“Direct identification of boundary values for the Laplace equation”,
International Conference on Inverse Problems, Recent Developments in Theories and Numerics, January 9th-12th, City University of Hong Kong, Extended Abstracts, p.35 (2002).
- [3] 代田健二, 村上 哲, 大浦洋子, 大西和榮, 安原一哉,
「水位内部観測に基づく変分法による地下透水係数の同定」,
第 51 回理論応用力学講演会 講演論文集, 286, pp.595-596, 日本学術会議, 東京 (2002.1.22-24).

- [4] 大西和榮,
「境界値逆問題の随伴型数値解法」,
月刊 地球, 総特集「地球物理学と数学との連携 – 逆問題の観点から –」, 海洋出版,
Vol.272, pp.108-116 (2002.2).
- [5] 林 圭佐, 大西和榮, 繁田岳美, 登坂宣好,
「Poisson 方程式に対する Dirichlet-Neumann 交代法の離散化誤差評価」,
第 21 回計算電気・電子工学シンポジウム発表論文集, pp. 273-276, 日本シミュレーション学会大会, 東京電力 (株) 技術開発センター, 横浜市鶴見区 (2002.6.19-20).
- [6] 飯島健太郎, 林 圭佐, 大西和榮,
「内点観測を伴う非定常熱方程式の境界値問題」,
第 21 回計算電気・電子工学シンポジウム発表論文集, pp. 117-120, 日本シミュレーション学会大会, 東京電力 (株) 技術開発センター, 横浜市鶴見区 (2002.6.19-20).
- [7] 大西和榮, 代田健二,
「境界値観測に基づく随伴数値解法」,
京都大学数理解析研究所 共同研究集会『逆問題解析の諸相』 予稿集, pp. 7-8
(2002.10.15-17).
- [8] K. Onishi,
“Numerical method for inverse boundary value problems by the adjoint method”,
International Workshop on Spectra of Differential Operators and Inverse Problems, Research Institute of Mathematical Sciences, Kyoto University, pp.36-38,
(2002.10.28-11.1).
- [9] 林 圭佐, 大西和榮,
「2 次元スカラー方程式に対する D-N 交代法の収束性」,
第 15 回計算力学講演会 講演論文集, 論文番号 829, pp. 807-808, 日本機械学会,
鹿児島大学工学部 (2002.11.2-4).
- [10] 大浦洋子, 大西和榮,
「境界要素法による調和関数の特異点の位置の同定」,
計算工学講演会論文集, Vol.8, pp.655-656, 日本計算工学会, 法政大学 ボナソナード
タワー (2003.5.19-21).
- [11] 大浦洋子, 大西和榮,
「調和関数のディリクレデータとノイマンデータを用いた特異点の位置の同定」,
日本機械学会 2003 年度年次大会, 講演番号 312, 徳島大学 (2003.8.6-8).
- [12] 大西和榮, 飯島健太郎,
「ラプラス方程式のコーシー問題と逆向き熱伝導方程式の直接解法」,
日本応用電磁気学会誌, Vol.11, No.2, pp.9-17 (2003).

研究分担課題「フィルター理論を用いた正則化法による数値計算」

研究分担者： 日本大学生産工学部・教授、登坂 宣好

研究内容と成果の概要

この分担課題研究では、工学における様々な逆問題の数値シミュレーションに対し、計算力学の立場から数値計算解析手法の開発を行ってきた。特に分担者の提唱する「フィルター理論を用いた正則化法」についての研究を深化させ、成果を得た。

工学上の逆問題は、主として力学現象や熱現象に関連する場合が多く、それらは、現象の数理モデルである支配微分方程式の逆問題として定式化される。その定式化に基づき逆解析するには、支配微分方程式の数値解析としての数値計算手法が必要になる。適切な数値計算手法を用いることによって上述の逆問題は、結果として“離散的逆問題”として再定式化されることになる。

その離散的逆問題を解くための有力な同定・推定アルゴリズムとして、これまでフィルター理論に基づいたフィルタリングアルゴリズムの構築を行い、特に正則化技法の観点から各種のフィルタの特性を明らかにするべく具体的な逆問題の数値シミュレーションを数多く重ねてきた。今回の分担研究においては、特に次の2点において成果を得た。

1. 構造損傷同定解析

構造物が大型化するに従い多くの部材から構成される離散的構造形式が多くなってきた。これらの構造物が様々な外力を受けて複雑な挙動を示すが、その安全性および機能性を確保するためには各部材に生ずる局所的な損傷を常時検出するシステムの構築が要求されている。そこで本研究では、これまで離散的逆問題の解析に対して展開してきた各種のフィルタ（カルマン、射影、パラメトリック射影）に基づいたフィルタリングアルゴリズムを同定手法として採用し、構造解析手法と結びつけた計算力学的立場からトラス構造物および浮遊式海洋建築物の構造損傷同定解析を進めた。

トラス構造物としてタイプの異なる3種類の平面トラスを選び、その力学的特性の違いに対して各々適合するフィルタリングアルゴリズムが存在することを明らかにした。また、トラス部材の損傷同定解析を行う際の観測データとして固有振動数のみを採用しているが、特に高次モードの観測が困難になることを想定し、高次モードに対応する観測データをどの程度除外しても同定結果に影響を与えないのか、すなわち固有振動数の必要最低モード次数を数値シミュレーション結果に基づいて決定することが出来た。

大型の浮遊式海洋建築物に対しては、提案する逆解析法を用いてユニット連結部バネの剛性低下の度合と損傷位置とを同時に同定できることを示した。

2. 熱伝導物体の同定解析

熱伝導物体の逆問題に対し、離散的逆問題として定式化し、数値計算手法（差分法、境界要素法）を用いて、非定常熱伝導物体の境界熱流量の同定と定常熱伝導物体内の欠陥形状同定解析を行い良好な同定結果を示した。

論文 (査読付き)

- [1] 遠藤龍司, 登坂宣好, 川上善嗣, 武藤俊広,
「フィルタリングアルゴリズムを用いた平面トラスの損傷同定解析」,
構造工学論文集, Vol.50B, pp.293-302, 2004 年 3 月
- [2] 遠藤龍司, 川上善嗣, 登坂宣好,
「構造損傷同定に用いるフィルタリングアルゴリズムの特性について」,
計算数理工学論文集, 第 3 巻, pp.55-60, 2003 年 6 月
- [3] 遠藤龍司, 登坂宣好, 川上善嗣, 塩田寿美子,
「パラメトリック射影フィルタに基づくアルゴリズムを用いた大型浮遊式海洋建築物模型の損傷同定解析」,
日本建築学会構造系論文集, 第 559 号, pp.237-244, 2002 年 9 月
- [4] 塩田寿美子, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「フィルタ理論を用いたブレース材を有するフレーム構造物の損傷同定解析」,
構造工学論文集, Vol.48B, pp.479-485, 2002 年 3 月
- [5] 遠藤龍司, 川上善嗣, 塩田寿美子, 登坂宣好,
「ユニット連結型浮遊式海洋建築物の損傷同定に用いるパラメトリック射影フィルタの特性について」,
構造工学論文集, Vol.48B, pp.471-477, 2002 年 3 月
- [6] R. Endo, N. Tosaka, T. Kawakami and T. Muto,
Damage Identification of Planer Truss by Filtering Theory,
ICOME2003, in Print
- [7] Y.Kawakami, R.Endo, and N.Tosaka,
Damage Identification analysis on large scaled floating offshore structure model by Parametric Projection Filter,
INVERSE PROBLEMS IN ENGINEERING, Elsevier Science Ltd., pp.205-212, 2003.
- [8] Y.Kawakami, R.Endo, S.Shiota, and N.Tosaka,
Damage Identification on Unit-Linked Floating Structure by Parametric Projection Filtering Algorithm,
The proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, Vol.1, pp.385-390, 2002
- [9] R.Endo, S.Shiota, and N.Tosaka,
Structural Damage Identification of Frame Model Based on Filtering Algorithm,
INVERSE PROBLEMS IN ENGINEERING, Elsevier Science Ltd., pp.153-160, 2002

口頭発表

- [1] 武藤俊広, 川上善嗣, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「塔状トラスの構造損傷解析手法としてのフィルタリングアルゴリズムの特性」,
日本計算工学講演会論文集, Vol.9, No.1, pp.253-256, 2004年5月
- [2] 武藤俊広, 川上善嗣, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「フィルタ理論を用いた塔状トラスの損傷同定解」,
第53回理論応用力学講演会講演論文集, pp.293-294, 2002年1月
- [3] 遠藤龍司, 登坂宣好, 川上善嗣,
「ヘルスマニタリングシステムを用いた浮体構造物の損傷同定解析」,
日本建築学会梗概集, A-2分冊, pp.435-436, 2003年9月
- [4] 塩田寿美子, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「フィルタ理論によるブレース構造の損傷解析」,
日本計算工学講演会論文集, Vol.8, No.1, pp.163-166, 2003年5月
- [5] 川上善嗣, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「連成系の損傷同定に用いるフィルタリングアルゴリズムの特性について」,
日本応用数学会講演予講集, pp.206-207, 2003年9月
- [6] 今井卓司, 塩田寿美子, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「フィルタ理論を援用したトラスシステムの損傷同定解析」,
日本建築学会梗概集, B-1分冊, pp.299-300, 2002年9月
- [7] 塩田寿美子, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「フィルタ理論を用いた静的解析に基づくトラスモデルの損傷同定解析」,
日本建築学会梗概集, B-1分冊, pp.300-301, 2002年9月
- [8] 塩田寿美子, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「静的解析に基づくフィルタ理論によるトラス構造物の損傷同定解析」,
日本計算工学講演会論文集, Vol.7, No.1, pp.591-594, 2002年5月
- [9] 塩田寿美子, 今井卓司, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「パラメトリック射影フィルタによるトラス構造物の損傷解析」,
第51回理論応用力学講演会講演論文集, pp.583-584, 2002年1月
- [10] 川上善嗣, 塩田寿美子, 遠藤龍司, 登坂宣好,
「パラメトリック射影フィルタを用いた浮体構造物の損傷同定」,
第51回理論応用力学講演会講演論文集, pp.585-586, 2002年1月
- [11] 今井卓司, 登坂宣好, 遠藤龍司,
「フィルタ理論によるトラス構造物の損傷解析」,
第51回理論応用力学講演会講演論文集, pp.587-588, 2002年1月

研究分担課題「境界積分方程式の正則化による逆問題解析」

研究分担者： 京都大学学術情報メディアセンター・教授、西村 直志

研究協力者： 京都大学大学院工学研究科・助手、吉川 仁

研究内容と成果の概要

亀裂同定の逆問題問題を中心に、その数値解析を境界積分方程式を利用して行ない成果を得た。

レーザ計測により得られる実データからクラックの位置や形状を決定する問題を、時間域境界積分方程式法 (time domain boundary integral equation method) を用いて解析する研究を行なった。レーザ計測により得られる実波形データからクラックを決定する手順は次のとおりである。まず、未知のクラックを有する供試体に、超音波トランスデューサにより弾性波を発生させ、クラックからの散乱波をレーザ干渉計で計測し実験データを得る。次に、クラックを形状パラメータで記述し、クラックからの散乱波を時間域 BIEM を用いて数値的に求める。最後に、実験値と数値解との差からなるコスト関数の値を最小とする形状パラメータからクラックを決定する。

しかし、時間域の波動解析において、超音波の様な波長の短い波の挙動を正確に表現するには、境界要素のサイズ・時間ステップ幅を小さくとる必要がある。ゆえに取り扱う問題は、未知数が数千～数万自由度の時間域の大規模問題となる。時間域 BIEM の大規模問題を解くために、従来型の (多重極法によらない) 時間域 BIEM の計算効率を2つの面から改良した。まず、畳み込み積分に関するアルゴリズムを改良し、無駄なメモリー使用や再計算を極力排除する方法を検討した。さらに、より多くのメモリーの確保と計算時間の短縮のために、コードの並列化を行った。一般に境界積分方程式法は得られる係数行列が密である事から、有限要素法などに比べてかえって単純に並列化できるが、時間域の境界積分方程式法では係数行列が疎になる事を考慮した並列化が必要となる。これらの改良により、大規模問題においても実用的な計算時間で解析を行ない得る BIEM コードが得られた事が第一の成果である。さらに、時間域 BIEM のアルゴリズム改良とコードの並列化により可能となった時間域の大規模 BIE 解析を行い、レーザ計測による超音波波形データからアルミ合金供試体の表面クラックを高い精度で決定し、提案する手法の有効性を確認した。

論文

- [1] H. Yoshikawa, N. Nishimura, S. Kobayashi,
On the determination of ultrasonic waves emitted from transducers using laser measurements with applications to defect determination problems,
土木学会応用力学論文集 Vol.4, pp.145-152, 2001.
- [2] 吉川仁, 西村直志, 小林昭一,
「3次元時間域動弾性波動問題における境界積分方程式法のアルゴリズム改良と並列化」,
土木学会応用力学論文集 Vol.5, pp.199-206, 2002.8.

- [3] H. Yoshikawa and N. Nishimura,
An Improved Implementation of Time Domain Elastodynamic BIEM in 3D for Large Scale Problems and its Application to Ultrasonic NDE,
Electronic Journal of Boundary Elements, Vol.1, pp.201-217, 2003.8.

口頭発表

- [1] 吉川仁, 西村直志, 小林昭一,
「レーザ計測を用いた超音波トランスデューサ特性同定解析と欠陥決定問題」,
日本機械学会 M&M2001 材料力学部門講演会, 北海道, 2001 年 8 月
- [2] 吉川仁, 西村直志, 小林昭一,
「レーザ計測実データを用いた超音波トランスデューサ特性決定逆問題の数値計算」,
京都大学数理解析研究所共同研究集会, 京都大学, 2001 年 12 月
- [3] 吉川仁, 西村直志, 小林昭一,
「3次元時間域動弾性境界積分方程式法の並列化」,
第7回日本計算工学講演会, 東京, 2002 年 5 月
- [4] 吉川仁, 西村直志, 小林昭一,
「レーザ計測による波形データを用いた超音波トランスデューサ特性同定と欠陥決定問題の解析」,
日本非破壊検査協会平成14年度春季講演大会, 東京, 2002 年 5 月
- [5] 吉川仁, 西村直志, 小林昭一,
「並列 BIEM による 3次元時間域動弾性問題の解法」,
土木学会第57回年次学術講演会, 北海道大学, 2002 年 9 月
- [6] 吉川仁, 西村直志,
「超音波非破壊評価に関する逆問題の3次元時間域動弾性境界積分方程式法による数値解法について」,
京都大学数理解析研究所共同研究集会, 京都大学, 2002 年 11 月
- [7] 吉川仁, 西村直志, 小林昭一,
「超音波による欠陥決定問題に関連する時間域動弾性 BIEM の大規模解析」,
第52回理論応用力学講演会, 東京, 2003 年 1 月
- [8] 吉川仁, 西村直志, 小林昭一,
「レーザ計測による速度波形データを用いた表面クラック決定解析」,
第10回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2003 年 1 月
- [9] H. Yoshikawa, N. Nishimura and S. Kobayashi,
“Large Determination of cracks using laser velocimetry and an improved BIEM”,
International Symposium on Inverse Problems in Engineering Mechanics (ISIP 2003),
Nagano City, Japan, Feb. 2003.

[10] 吉川 仁, 原 雄一, 西村 直志,
「超音波非破壊評価に於ける大規模動弾性問題の時間域境界要素法による解法につ
いて」,
日本応用数理学会 2003 年度年会, 京都大学, 2003 年 9 月

[11] 原 雄一, 吉川仁, 西村 直志,
「レーザ計測波形データを用いたクラック決定解析の精度の改善に関する研究」,
土木学会第 58 回年次学術講演会, 徳島大学, 2003 年 9 月

研究分担課題「逆問題・および正則化法に対する数学解析」

研究分担者： 東京大学大学院数理科学研究科・助教授、山本 昌宏

研究内容と成果の概要

幅広いタイプの逆問題解析において、解の一意性と条件安定性についての成果を得ると共に、正則化法の離散化について数学解析の視点から注意を

本分担研究においては、過剰決定なデータから発展方程式の係数や非斉次項のようなパラメータ、さらには方程式が成り立っている領域形状を決定するという幅広い逆問題の研究を扱った。これらの問題はコンピュータ断層撮影法 (CT) など実用上の見地から重要な問題であり、その数学解析が大いに要求されているにも関わらず、そのような逆問題がアダマールの意味で適切でないために、その数学的研究は十分とはいえない面がある。しかも、多くの逆問題のなかには適切性の構造が存在するにも関わらず、逆問題は無差別に“非適切問題”とみなされてきた傾向もある。そこで、ここでは偏微分方程式に対する逆問題において適切性の構造を求め、それらの結果を数値解析と関連付けることに主眼をおいた。

特に有限回の観測によって逆問題を取り扱う手法に Carleman 評価と呼ばれる重み付き不等式がある。それによって単独の双曲型方程式やマックスウェル方程式や弾性体の方程式といった双曲系方程式における係数の単独の観測による決定問題に関して成果を得た。具体的には、条件安定評価ではあるが、係数の差の L^2 ノルムを境界データのソボレフ・ノルムで上と下から評価することに成功した。

さらに、数値解析のためには安定な方法で近似解を再構成することが要求されているが、このようなことは、我々の問題が通常の意味で適切にならないこともあるので、特に注意を要することである。そのためにさまざまな方法があるが、チホノフの正則化法を偏微分方程式に対する逆問題に適用して正則化法によって得られた近似解の真の解への収束についても論じている。

また逆散乱問題においては遠隔場における散乱データから障害物の形状を決定することが基本的な課題であるが、Lax - Phillips らによる先駆的な業績以来数多くの研究がなされてきたにも関わらず遠隔場の単独の観測による一意性は未だに未解決である。本分担研究において、必ずしも凸とは限らない多角形領域の範囲内で一意性を証明した。主要な方法論は解の特異性の追求である。さらに類似の方法論で、楕円型方程式の係数に含まれる不連続界面の決定における一意性も確立した。

論文

- [1] M. Yamamoto, J. Cheng and G. Ding,
Uniqueness along a line for an inverse wave source problem,
Comm. Partial Differential Equations **27** (2002), 2055–2069.
- [2] M. Yamamoto and Yu. Anikonov,
An inverse problem for a system of Lamé differential equations,
Dokl. Akad. Nauk **385** (2002), 439–442.

- [3] M. Yamamoto and V. Komornik,
Upper and lower estimates in determining point sources in a wave equation,
Inverse Problems **18** (2002), 319–329.
- [4] M. Yamamoto, J. Cheng and G. Bruckner,
An inverse problem in diffractive optics: conditional stability,
Inverse Problems **18** (2002), 415–433.
- [5] M. Yamamoto and J. Cheng, *Identification of convection term in a parabolic equation with a single measurement,*
Nonlinear Analysis **50** (2002), 163–171.
- [6] M. Yamamoto and J. Elschner,
An inverse problem in periodic diffractive optics: reconstruction of Lipschitz grating profiles,
Applicable Analysis **81** (2002), 1307–1328.
- [7] M. Yamamoto, J. Cheng and Y.C. Hon,
Conditional stability estimation for an inverse boundary problem with non-smooth boundary R^3 ,
Trans. Amer. Math. Soc. **353** (2001) 4123–4138.
- [8] M. Yamamoto, J. Cheng, Y.C. Hon and T. Wei,
Numerical computation of a Cauchy problem for Laplace's equation,
ZAMM Z. Angew. Math. Mech. **81** (2001), 665–674.
- [9] M. Yamamoto and O.Yu. Imanuvilov,
Global uniqueness and stability in determining coefficients of wave equations,
Commun. Partial Differential Equations **26** (2001), 1409–1425.
- [10] M. Yamamoto,
One unique continuation for a linearized Benjamin-Bona-Mahony equation,
J. Inverse and Ill-posed Problems **11** (2003) 537–543.
- [11] V. Isakov and M. Yamamoto,
Stability in a wave source problem by Dirichlet data on subboundary,
J. Inverse and Ill-posed Problems **11** (2003) 399–409.
- [12] M. Yamamoto and X. Zhang,
Global uniqueness and stability for a class of multidimensional inverse hyperbolic problems with two unknowns,
Appl. Math. Optim. **48** (2003) 211–228.

- [13] J. Elschner, G. Schmidt and M. Yamamoto,
Global uniqueness in determining rectangular periodic structures by scattering data with a single wave number,
J. Inverse and Ill-posed Problems **11** (2003) 235 – 244.
- [14] S. Kim and M. Yamamoto,
Uniqueness in identification of the support of a source term in an elliptic equation,
SIAM J. Math. Anal. **35** (2003) 148–159.
- [15] O. Imanuvilov and M. Yamamoto,
Carleman inequalities for parabolic equations in Sobolev spaces of negative order and exact controllability for semilinear parabolic equations,
Publ. Res. Inst. Math. Sci. **39** (2003) 227 – 274.
- [16] J. Elschner, G. Schmidt and M. Yamamoto,
An inverse problem in periodic diffractive optics: global uniqueness with a single wavenumber,
Inverse Problems **19** (2003) 779 – 787.
- [17] O. Imanuvilov, V. Isakov and M. Yamamoto,
An inverse problem for the dynamical Lamé system with two sets of boundary data,
Comm. Pure Appl. Math. **56** (2003) 1366–1382.
- [18] K. Liu, M. Yamamoto and X. Zhang,
Observability inequalities by internal observation and their applications,
J. Optim. Theory Appl. **116** (2003) 621 – 645.
- [19] O. Imanuvilov and M. Yamamoto,
Determination of a coefficient in an acoustic equation with a single measurement,
Inverse Problems **19** (2003) 157 – 171.

著書

- [1] 山本昌宏:逆問題入門, 岩波書店, 2002.

口頭発表

- [1] M. Yamamoto,
“Inverse problems for hyperbolic systems: uniqueness and stability”,
City University of Hong Kong, China, January 9, 2002.

研究分担課題「弾性体逆問題の数学解析」

研究分担者： 北海道大学大学院理学研究科・教授、 中村 玄

研究内容と成果の概要

物体内部にある介在物・空洞・亀裂など、媒質の不連続性や材料係数の同定に関する逆問題の逆解析手法の研究を行い成果を得た。

媒質の不連続性の同定に関しては、探針法と囲い込み法の改良と完成を目指した。特に探針法に不可欠な一意接続定理と反射解の解析について研究した。一意接続定理については、非等方弾性方程式に対して研究を行った。この結果、2次元非等方弾性体方程式、残量応力を持つある種の等方弾性方程式に対して一意接続定理が成り立つことを示すことができた。そして、横等方弾性方程式に対しては、一意接続定理が部分的に成り立つことを示した。反射解の解析については、導電体の方程式・弾性体の方程式に対して研究を行った。その結果、非等方導電体の方程式について係数に関する仮定を可能な限り弱めた時にも可能な反射解の解析手法を開発した。弾性方程式に対しては、非等方弾性方程式に対しても適用可能な反射解の解析手法を開発した。まだ一意接続定理に対しては未解決などところがあるが、導電体の方程式と弾性体の方程式に対しては、探針法の理論的な研究はほぼ完成したと判断している。

探針法については、研究協力者の R. Potthast 教授が開発したその数値計算手法の実行が可能となる研究環境を北海道大学の逆問題研究グループ内に構築した。また囲い込み法については、その構成が難しい複素幾何光学解に替えてより容易に構成可能な振動・減衰解を用いることにより囲い込み法の適用範囲を広げた。注目すべき成果としては、探針法が適用できない横等方弾性体内の空洞形状の再構成を示すことができた点である。

以上は静的または定常な場合の媒質の不連続性や材料係数の同定の逆問題に関する逆解析手法である。非定常波動による未知介在物同定の逆問題に関しては、研究協力者の代田氏が開発した数値計算手法の数学的な枠組みを作った。そして同様な枠組みが亀裂や空洞の同定に関しても可能であるとの知見を得た。

材料係数の同定の逆問題に関しては、残留応力の非破壊検査法の数学的な解析手法と鉄・コンクリート接合梁の損傷同定について研究した。その研究成果は、次の三点である：(1) 線形化走時関数による斉次等方弾性体内の残留応力の同定に関するアルゴリズムを考案した。これは製鉄所で製造される厚板内の残留応力同定への応用が期待できるものである。(2) 非斉次非等方弾性体の表面波の分散公式を導出と残留応力同定への応用の試みである。ただし、まだその分散公式は幾何学量と物理量が分離できおらず、逆問題への応用にはまだ十分なレベルには達していない。(3) 一般道路にかかる橋の損傷の同定で用いられている周波数応答関数を使って、最もいたみ易い鉄梁とコンクリート梁の接合部分の損傷を同定する逆解析手法を確立した。

論文

- [1] G. Nakamura,
Inverse problems for elastic bodies (Japanese),

- [1] Sūgaku 53(2001)113-124.
- [2] J. Cheng, G. Nakamura and E. Somersalo,
Uniqueness of identifying the convection term,
Commun. Korean Math. Soc. 16 (2001), no. 3, 405-413.
- [3] G. Nakamura and K. Tanuma,
Local determination of conductivity at the boundary from Dirichlet to Neumann map,
Inverse Problems, 17(2001)405-419.
- [4] J. Cheng and G. Nakamura,
Stability for the inverse potential problem by finite measurements on the boundary ;
Inverse Problems, 17(2001)273-280.
- [5] M. Ikehata, G. N. Makrakis and G. Nakamura,
Inverse boundary value problem for ocean acoustics,
Math. Method. Appl. Sci., 24(2001)1-8.
- [6] H. Ammari, H. Kang, G. Nakamura and K. Tanuma,
Complete asymptotic expansions of solutions of the system of elastostatics in the presence of an inclusion of small diameter and detection of an inclusion,
J. Elasticity, 67(2002) pp. 97-129
- [7] H. Kang and G. Nakamura,
Identification of nonlinearity in a conductivity equation via the Dirichlet-to-Neumann map,
Inverse Problems, 18 (2002)pp.1079-1088
- [8] K. Tanuma, C-S. Man, M. Huang and G. Nakamura,
Surface impedance tensors of textured polycrystals,
Journal of Elasticity, 67 (2002)pp. 131-147.
- [9] H. Kang and G. Nakamura,
Identification of nonlinearity in a conductive equation via the Dirichlet-to-Neumann map,
Inverse Problems 18(2002)pp.1079-1088.
- [10] J. Cheng, J. Liu and G. Nakamura,
Inverse scattering for multiple obstacles,
Theoretical Appl. Mech., 51(2002)pp.401-410.
- [11] M. Eller, V. Isakov, G. Nakamura and D. Tataru,
Uniqueness and stability in the Cauchy problem for Maxwell and elasticity systems,
Studies in Math. and its Appl., 31(2002)pp.329-349.

- [12] M. Akamatsu and G. Nakamura,
Well-posedness of initial-boundary value problems for piezoelectric equations,
Appl. Anal. 81 (2002)pp. 1, 129-141.
- [13] G. Nakamura and K. Tanuma,
Formulas for reconstructing conductivity and its normal derivative at the boundary from the localized Dirichlet to Neumann map,
in : Recent Development in Theories & Numerics, International Conference on Inverse Problems, Yiu-Chung Hon, Masahiro Yamamoto, Jin Cheng and June-Yub Lee (eds.), World Scientific, 2003, pp.192-201.
- [14] H. Kang and G. Nakamura,
Identification of nonlinearity in a conductive equation via the Dirichlet-to-Neumann map,
Inverse Problems 18(2002)pp1079-1088.
- [15] J. Cheng, J. Liu and G. Nakamura,
Inverse scattering for multiple obstacles,
Theoretical Appl. Mech., 51(2002)pp.401-410.
- [16] M. Eller, V. Isakov, G. Nakamura and D. Tataru,
Uniqueness and stability in the Cauchy problem for Maxwell and elasticity systems,
Studies in Math. and its Appl., 31(2002)pp.329-349.
- [17] G. Nakamura and G. Uhlmann,
Asymptotic methods in inverse problems-complex geometrical optics solutions,
In S.I. Kabanikhin and V. G. Romanov (editors), Ill-Posed and Inverse Problems, pp.297-320. VSP, the Netherlands 2002 .
- [18] H. Kang, M. Lim and G. Nakamura,
Detection of surface breaking cracks in two dimensions,
Inverse Problems, 19(2003) pp. 909-918
- [19] G. Nakamura and J-N. Wang,
Unique continuation for an elasticity system with residual stress and its applications,
SIAM J. Math. Anal.,35(2003) pp. 304-317
- [20] K. Kazumi, C-S. Man, M. Huang and G. Nakamura,
Surface impedance tensors of textured polycrystals,
J. Elasticity, 67(2003) pp. 131-147
- [21] G. Nakamura, G. Uhlmann and J.-N. Wang,
Reconstruction of cracks in an inhomogeneous anisotropic elastic medium,
J. Math. Pures. Appl.,82(2003)pp. 1251-1276

- [22] J. Cheng, J. Liu and G. Nakamura,
Recovery of the shape of an obstacle and the boundary impedance from far-field pattern,
J. Math. Kyoto Univ.,43(2003) pp. 165-186.
- [23] G. Nakamura and J-N. Wang,
Construction of oscillating-decaying solutions for anisotropic elasticity systems,
The Chinese Journal of Mechanics, Series A, A special issue dedicated to the Seventieth Birthday of Professor Thomas Chi Tsai Ting, Vol. 19, No. 1 (2003), 119-125.
- [24] V. Isakov, G. Nakamura and J-N. Wang,
Uniqueness and stability in the Cauchy problem for the elasticity system with residual stress,
Contemp. Math. 333(2003)pp.99-113.
- [25] M. Ikehata and G. Nakamura,
Reconstruction formula for identifying cracks,
J. Elasticity, 71(2003)pp.59-72.
- [26] Y. Daido, M. Ikehata and G. Nakamura,
Reconstruction of inclusions for the inverse boundary value problem with mixed type boundary condition,
Appl. Analysis, 83(2004)109-124.

論文 (査読なし)

- [1] 中村 玄
「弾性体の逆問題の数学解析」
月刊 地球、24(2002)132-145.
- [2] G. Nakamura,
Inverse problems for elasticity, Selected papers on analysis and differential equations,
AMS Transl. Ser. 2, 211(2003)71-85.

口頭発表

- [1] M. Ikehata and G. Nakamura, "Identification of crack by boundary measurement",
Contemporary Research in Theoretical and Applied Mechanics, June 22-28, 2002,
Blacksburg, VA , USA..
- [2] G. Nakamura, C-S. Man and K. Tanuma, "Dispersion formula for Rayleigh waves",
ICSSD 2002 Conference December 16-18, 2002, Singapore.

- [3] H. Ammari, H. Kang, G. Nakamura and K. Tanuma,
 "Asymptotic expansion of solutions to the Lamé system in presence of inclusion
 and applications",
 ICSSD 2002 Conference December 16-18, 2002, Singapore. K. Tanuma, C-S. Man,
 M. Huang and G. Nakamura, Surface impedance tensors of textured polycrystal,
 ICSSD 2002 Conference December 16-18, 2002, Singapore.
- [4] G. Nakamura,
 "Identifying cracks in anisotropic media",
 5 th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, July 7-11,
 2003, Sydney, Australia.
- [5] G. Nakamura and J-N. Wang,
 "Identification of cavity in inhomogeneous media",
 International Workshop on Spectra of Differential Operators and Inverse Problems,
 Oct. 28-Nov. 1, 2002, RIMS Kyoto Univ..
- [6] G. Nakamura,
 "Dispersion formula for Rayleigh waves",
 Future Directions in Applied Mathematics-International Conference on the occasion
 of Jean-Claude Nédélec's 60th Birthday, June 18-21, 2003, Ecole Polytechnique,
 Paris, France.
 (以上 国際研究集会, 招待講演)
- [7] 田沼一美、中村玄、
 「局所化された Dirichlet to Neumann map からの導電係数およびその微分の再構成」、
 第 50 回応用力学講演会、2001 年 1 月 23 日-25 日、日本学会議。
- [8] 中村玄、程晋、
 「有限回の境界上の観測によるポテンシャル同定の安定性」、
 第 50 回応用力学講演会、2001 年 1 月 23 日-25 日、日本学会議。
- [9] 中村玄、S. Ivanov,
 「層状弾性体内の残留応力の同定」、
 日本数学会、2001 年度秋季総合分科会、2001 年 10 月、九州大学
- [10] 中村玄、
 「亀裂の同定」、
 「数学解析の望ましい姿を探って」研究集会、2002 年 12 月 12 日-14 日、九州大学
 国際ホール。

- [11] 程晋、池島優、劉繼軍、中村玄、
 “Recovery of the boundaries and types for multiple obstacles from the far-field pattern”,
 第 51 回応用力学講演会、2002 年 1 月 22 日-24 日、日本学術会議
- [12] 池島優、中村玄、
 「亀裂の同定」、
 第 51 回応用力学講演会、2002 年 1 月 28 日-30 日、日本学術会議
- [13] 中村玄、Samuli Siltanen、田沼一美、王盛章、
 「境界における導電係数同定の数値実験」、
 第 53 回応用力学講演会、2004 年 1 月 27 日-29 日、日本学術会議
- [14] 大道雄喜、中村玄、
 “Reconstruction of inclusions for the inverse boundary value problem with mixed type boundary condition and source term”,
 日本数学会、2004 年度年会、2004 年 3 月、筑波大学
- [15] 中村玄、G. Uhlmann, J-N. Wang,
 “Unique continuation for elliptic system”,
 日本数学会、2004 年度年会、2004 年 3 月、筑波大学
- [16] 中村玄、J. Cheng and C-L. Lin,
 “Unique continuation along hypersurfaces for second order anisotropic systems with real analytic coefficients”,
 日本数学会、2004 年度年会、2004 年 3 月、筑波大学

研究分担課題「逆問題の解の再構成手法の確立」

研究分担者： 群馬大学工学部・助教授、田沼 一実

研究の内容と成果の概要

逆問題の解の再構成手法に関し、局所化された Dirichlet - Neumann 写像による方法を提案して成果を上げると共に、材料工学に現れる具体的な弾性体逆問題の解析について解を再構成する手法の基礎を与えた。その要点は以下の2点である。

1. 本研究では、第一に、導電方程式に対して、局所化された Dirichlet to Neumann map から、境界での導電係数の値および境界法線方向の微分の値を同時に再構成する公式を与えた。これは、導電体の表面のある部分において、電気変位と電流を局所的に測定することで、その表面近くでの導電率を決定する境界値逆問題に対する数学解析での1つの解答である。この公式では、導電係数の regularity を局所的に仮定していること、境界での導電係数を再構成し次にその値を使って境界法線方向の微分の値を再構成するという従来の帰納的再構成ではなく、導電係数と法線方向の微分の値とを同時に再構成していること、が特色である。医療工学でのインピーダンス トモグラフィー、工学での非破壊検査等において、すべての境界上で観測情報を得ることは難しく、実際には境界の一部でのみ観測を行い、その情報から観測点近くの試験材料の特性を決定していることに対応するものであり、また、導電係数の内部に向かった変化を再構成する数値実験の出発点として、効率の良い再構成方法を提案するものである。この公式は、極限值として再構成値を与えるものであるが、さらに、極限変数を有限で打ち切った場合に再構成値との誤差がどれくらいであるかを、極限変数の負巾で評価した。

次に、以上の考え方を踏襲し、局所化された Dirichlet to Neumann map から、境界での導電係数および境界法線方向の導電係数の導関数を、(1) 各点ごとに、(2) 弱形式で、(3) フーリエ変換像で再構成する公式を、一貫した方法で与えることができた。導電方程式の弱解の主要項から導かれる Dirichlet to Neumann map の主要部分の計算と、弱解と主要項との差の評価により、これらの公式において必要な導電係数についての optimal な正則性の条件を提案した。さらに、異なる導電係数に対する Dirichlet to Neumann map の差の作用素ノルムを用い、それらの導電係数の再構成量 ((2) ならば弱形式, (3) ならばフーリエ変換像) の差を評価する安定性の考察を行った。一方、(2) での弱形式での再構成、すなわち、与えられた密度関数と導電係数との合成積を再構成することは、導電係数の値がごくわずかの領域で変化する場合に、導電係数自身の再構成よりも、インピーダンス トモグラフィーの現場では实际的である。この観点から、(2) の弱形式での再構成公式を数値実験で実現化を試みている。

2. 材料の加工過程では、弾性体に組織としての異方性 (texture) が生じることが指摘されており、米国 Kentucky 大学数学科の C.S.Man 教授は、弾性体の組織異方性と群の表現論の関連についての研究、および実験による検証により、現象理論両面において最も信頼できる構成方程式を導いた。この構成方程式を基礎にして本研究では、組織異方性

をもった弾性体に対し、非等方弾性体方程式を扱う Stroh の定式化を基礎にして、境界面での変位と表面力との線形関係をあらわす Surface impedance tensor の表示式を与えた。この公式は、組織異方性がない場合は、等方弾性体の Surface impedance tensor となるが、組織異方性の線形オーダーまでの項を含むものである。この結果から、Surface impedance tensor を局所化された Dirichlet to Neumann map から再構成し、次に Surface impedance tensor から弾性係数を再構成することで境界値逆問題が取り組み可能であることがほぼ確信された。

一方、工学での材料の製造、組立等の加工過程で、弾性体の内部に生じた残留応力は、加工後の弾性体の強度に影響するので、外部の観測から内部の残留応力の情報を得ることが、非破壊検査での重要なテーマとなる。そこで、本研究ではつぎに、残留応力と組織異方性をもった弾性体において、表面を伝播する Rayleigh 波の速度の分散公式を導出した。すなわち、残留応力と組織異方性によって生じる非等方性を、線形のオーダーまで考慮し、等方弾性体における Rayleigh 波速度からの摂動を、残留応力と組織異方性の一次式の形で求めた。材料力学の分野では、Rayleigh 波速度の等方弾性体からの摂動を観測することで、弾性体の異方性の情報を得る逆問題が20年以上にわたり、研究されている。本研究の結果は、残留応力に起因する Rayleigh 波速度の相対的变化を表す音弾性公式を、包括的に含むものであり、さらに組織異方性が音弾性係数 (acoustoelastic coefficient) に及ぼす影響を、明らかにするものである。したがって、残留応力と組織異方性の双方をもった弾性体において、表面を伝播する Rayleigh 波の速度から残留応力と組織異方性とを同定する逆問題、より現実的には、組織異方性をもった弾性体において、残留応力を同定する逆問題に対して、本研究で得られた分散公式は、有用と期待される。

論文

- [1] G. Nakamura and K. Tanuma,
Local determination of conductivity at the boundary from the Dirichlet-to-Neumann map,
Inverse Problems, Vol.17 (2001), 405-419.
- [2] Gen Nakamura and Kazumi Tanuma,
Direct determination of the derivatives of conductivity at the boundary from the localized Dirichlet to Neumann map,
Communications of the Korean Mathematical Society, Vol.16, No. 3 (2001), 415-425.
- [3] Habib Ammari, Hyeonbae Kang, Gen Nakamura and Kazumi Tanuma,
Complete asymptotic expansions of solutions of the system of elastostatics in the presence of an inclusion of small diameter and detection of an inclusion,
Journal of Elasticity, Vol.67 (2002), 97-129.
- [4] Kazumi Tanuma, Chi-Sing Man, Mojia Huang and Gen Nakamura,
Surface impedance tensors of textured polycrystals,

Journal of Elasticity, Vol.67 (2002), 131-147.

- [5] Kazumi Tanuma and Chi-Sing Man,
Angular dependence of Rayleigh-wave velocity in prestressed polycrystalline media with monoclinic texture,
Journal of Elasticity, Vol.69 (2002), 181-214.
- [6] Gen Nakamura and Kazumi Tanuma,
Formulas for reconstructing conductivity and its normal derivative at the boundary from the localized Dirichlet to Neumann map,
in Recent Development in Theories & Numerics, International Conference on Inverse Problems, Yiu-Chung Hon, Masahiro Yamamoto, Jin Cheng and June-Yub Lee (eds.), World Scientific, 2003, pp.192-201.

論文 (査読なし)

- [1] 田沼一実, 係数同定のための逆問題, 数学解析の望ましい姿を探って, 伊藤, 後藤, 宮川編, 九州大学出版会, 2004 年 3 月, pp.117-126.

口頭発表

- [1] 田沼一実 中村玄,
“Reconstruction of Elastic Tensor at the Boundary from the Localized Dirichlet-to-Neumann Map”,
日本数学会秋期総合分科会, 九州大学, 2001 年 9 月
- [2] 田沼一実 中村玄,
「弾性テンソルの局所的再構成」,
数理科学セミナー, 茨城大学, 2001 年 12 月
- [3] 田沼一実 中村玄,
“Reconstruction of the derivative of conductivity at the boundary from the localized Dirichlet to Neumann map (pointwisely, weakly, and in the form of Fourier transform)”,
京都大学数理解析研究所 共同研究集会「逆問題・非適切問題の解の再構成と数値解析」, 京都大学, 2001 年 12 月
- [4] Gen Nakamura and Kazumi Tanuma,
“Formulas for reconstructing conductivity and its normal derivatives at the boundary from the localized Dirichlet to Neumann map (invited)”,
International Conference on Inverse Problems, City University of Hong Kong, 2002 年 1 月

- [5] 田沼一実,
「導電方程式および弾性体方程式に対する境界値逆問題 (特別講演)」,
日本数学会 2002 年度年会応用数学分科会, 明治大学駿河台キャンパス, 2002 年 3 月
- [6] Gen Nakamura and Kazumi Tanuma,
“Reconstruction of anisotropic elastic tensor at the boundary from the localized Dirichlet to Neumann map”,
International Workshop on Spectra of Differential Operators and Inverse Problems,
Research Institute of Mathematical Sciences, Kyoto University, 2002 年 10 月
- [7] 田沼一実,
「係数同定のための境界値逆問題」,
研究集会「数学解析の望ましい姿を探って」, 九州大学, 2002 年 12 月
- [8] Kazumi Tanuma, Chi-Sing Man, Mojia Huang and Gen Nakamura,
“Surface impedance tensors of textured polycrystals”,
The Second International Conference on Structural Stability and Dynamics, Singapore, 2002 年 12 月
- [9] 田沼一実, Hyeonbae Kang,
“An inverse problem for scalar conservation laws”,
日本数学会秋期総合分科会, 千葉大学, 2003 年 9 月
- [10] 田沼一実, Hyeonbae Kang,
「スカラー保存則方程式に対する逆問題」,
京都大学数理解析研究所 共同研究集会「逆問題解析の諸相」, 京都大学, 2003 年 10 月
- [11] 田沼一実, Chi-Sing Man,
“Perturbation formula for the velocity of Rayleigh waves in weakly anisotropic elastic media”,
ワークショップ: 逆問題の数学解析と数値解法, 東京大学大学院数理科学研究科, 2004 年 1 月
- [12] 田沼一実, Hyeonbae Kang,
“Inverse problems for scalar conservation laws”,
数理科学セミナー, 群馬大学, 2004 年 1 月

研究分担課題「自由境界問題から派生する非適切問題の解析」

研究分担者：九州大学大学院数理学研究院・助教授、木村 正人

分担者の研究概要

いくつかの形状決定問題・自由境界問題に関連する非適切問題の解析を行い、正則化法も含めて大きく次の3点の成果を得た。

1 有界変動関数のクラスを利用した形状決定問題の解析

表面張力効果に相当する Gibbs-Thomson 則を考慮した固相・液相間の相転移を記述する Stefan 問題や、反応拡散系を用いた代表的な相分離のモデルである Cahn-Hilliard 方程式の特異摂動によって得られる Mullins-Sekerka 自由境界問題に関連した形状決定問題の解析を行った。もともとの数理モデルの内包する変分構造を利用して、有界変動関数のクラスにおける変分問題として定式化を行った。これは非適切問題に対する正則化法とも密接に関連しており、今後の形状同定逆問題の正則化法への応用が期待され。(なお、本研究は S.Luckhaus 氏との共同研究である。)

2 微分可能でないエネルギー関数を持つ時間発展方程式の解析

近年数理モデル解析などに応用がされてきている、微分可能でないエネルギー汎関数に対する勾配流の解析を行った。時間大域的な解の一意存在証明及び、定常解の分類・安定性の解析を行った。特に、エネルギーの微分不可能性のため、解のふるまいには空間局所的な性質が強く、新しい概念として局所安定性という考え方を導入して解析を行った。(なお、本研究は白川健氏との共同研究である。)

3 符号付距離関数を使った Level Set Method による数値解析

境界を等高線として捉える Level Set Method は、有力な移動境界問題の数学解析及び数値解析の方法として注目を集めているが、特に移動境界からの符号付距離関数を等高線関数として採用した数値解法を曲率流れ問題と Stefan 問題などに対し提案した。一般に Stefan 問題などの移動境界問題の数値解法は多くの経験に基づく人為的な操作を含んだ非常に複雑なものであるが、本研究では有限要素法と Level Set Method、符号付距離関数を用いることにより、3次元問題にも適用可能な非常に簡便かつ明瞭な数値解法を提案することができた。また、与えられた流れの中の界面のシミュレーションにも適用し、収束証明を与えた。(なお、本研究は野津裕史氏との共同研究である。)

論文

- [1] M. Kimura and H. Notsu,
A level set method using the signed distance function,
Japan J. Indust. Appl. Math. 19 (2002), No.3, pp. 415-446.
- [2] M. Kimura,
Numerical analysis of moving boundary problems,

Sugaku Expositions, 15 (2002), No.1, pp. 71-88.

論文 (プレリント等)

- [1] K. Shirakawa and M. Kimura,
Stability analysis for Allen-Cahn type equation associated with the total variation energy,
Technical Reports of Mathematical Sciences Chiba University, Vol. 18 (2002), No. 3 (To appear in Nonlinear Analysis)
- [2] 木村正人,
「Hele-Shaw 移動境界問題の数理」,
物性研究, 78 (2002), No.2, pp. 159-171.
- [3] M. Kimura and S. Luckhaus,
A variational problem arising from Mullins-Sekerka problem,
Preprint No.69 (2001) Max Planck Institute Leipzig.

口頭発表

- [1] 木村正人,
「レベルセット法による移動境界の数値解析」,
応用数理学会, 特別講演 (九州大学) 2001 年 10 月
- [2] M. Kimura,
“A level set method for moving boundary problems”,
ICRACM 2001 “International Conference on Recent Advances in Computational Mathematics” (Matsuyama, Japan) 2001 年 10 月
- [3] 小村秀樹, 木村正人, 三村昌泰,
「ある自己触媒反応系の数値計算について」,
応用数学合同研究集会, (龍谷大学) 2001 年 12 月
- [4] 木村正人,
「準定常 Stefan 問題とある幾何学的変分問題について」,
九州大学・関数方程式セミナー, (福岡市) 2002 年 4 月
- [5] 木村正人,
「準定常ステファン問題の時間離散化について」,
数値計算の高度化と高信頼化に関するワークショップ, (弘前市) 2002 年 8 月
- [6] 木村正人,
「準 Stefan 問題に対する変分的アプローチ」,
日本応用数理学会 2002 年度年会, (横浜市) 2002 年 9 月

- [7] 三好秀徳, 木村正人, 三村昌泰,
「解の空間局在性の定量化とアダプティブFEMへの応用」,
応用数学合同研究集会, (龍谷大学) 2002年12月
- [8] 木村正人,
“Mathematical study on Allen-Cahn type equation with a modified interfacial energy”,
材料科学におけるパターン形成の数理, (東広島市) 2003年8月
- [9] 木村正人,
「符号付距離関数を用いたレベルセット法について」,
数値計算の高度化と高信頼化に関する札幌ワークショップ, (札幌市) 2003年8月

研究分担課題「弾性体の亀裂・欠陥同定問題の解析」

研究分担者： 京都大学大学院情報学研究科・講師、 若野 功

研究協力者： 京都大学大学院情報学研究科・COE 研究員、 東森 信就

研究内容と成果の概要

弾性体の内部亀裂・内部欠陥を同定する逆問題について、亀裂先端での弾性方程式の解の構造を明らかにすると共に、境界観測による静弾性の欠陥同定問題において成果を得た。具体的な成果は以下の2点であり、亀裂に対する順問題による解析は分担者の成果、欠陥同定の逆問題解析は協力者によるものである。

1 亀裂先端での弾性方程式の解の構造

2次元弾性体問題において、物体内部に滑らかな曲線亀裂が存在する場合の亀裂先端での応力集中に関する数学解析および関連する数値解析の研究を行なった。

2次元平面全体を均質で等方的な弾性体とし、そこに滑らかな曲線亀裂が存在する場合に、亀裂を含む領域上での静弾性方程式の境界値問題の弱解(弾性体の変位場に対応)を亀裂開口変位を密度関数とするポテンシャル表現を導き、境界値問題と亀裂上の境界積分方程式の同値性を弱解のレベルで証明した。この境界積分方程式の解は対応する変位場の亀裂開口変位となるが、同時に亀裂上の積分方程式に対する弱定式化によって、境界値問題の弱解に対応する亀裂開口変位が属する自然な関数空間において積分方程式の弱定式化によって得られる双一次形式が強圧的であることを証明した。

さらに、解の特異性の数学解析においては亀裂開口変位の特異性を明らかにし、この結果と弱解のポテンシャル表示から変位場の特異性を明かにした。従来、数学的には証明が与えられないまま、直線亀裂に対する結果から類推して信じられていたことに対する証明を厳密に与えたものである。

数値解析に関しては、亀裂開口変位を解とする積分方程式の数値解の収束証明を与えた。これは積分方程式に対して Galerkin 境界要素法を適用したものであるが、解の特異性に対応する特異要素を用いることにより、亀裂開口変位に対する近似解の収束証明を与えることができた。解の特異項の係数がいわゆる応力拡大係数であるが、数値計算の結果として特異要素の係数として得られる値が応力拡大係数の良い近似値を与えることを確認した。2次元有界領域においても、同様の結果を得た。

2 3次元弾性体の内部構造を同定逆問題

3次元弾性体の内部構造を同定する手法を、モデル化した弾性方程式系に対する逆問題の数学解析的研究である。特に3次元の有界な既知領域に含まれる有限個の未知領域を Lamé system の解の部分境界観測を利用して同定する逆問題を取り上げ、その成果として逆問題の解の「条件安定性評価」が得られた。本研究以前にはいわゆる「電気ポテンシャル法」による金属内部の欠陥同定を想定した Laplace 方程式の逆問題の研究が多数存在し、逆問題の解の条件安定性評価が G. Alessandrini をはじめとする研究により得られていた。本研究協力者の研究はこれらの結果を楕円型方程式系である Lamé system の場

合に拡張したものである。

これらの問題や電気ポテンシャル法の問題は、未知境界同定逆問題と呼ばれるものであり、工学では機械等の材料内部の空洞・亀裂等の欠陥を同定するための非破壊検査法の数理モデルとして研究されているものである。従来の電気ポテンシャル法をモデルとした Laplace 場による境界同定逆問題は、金属に直流定常電流を通電したとき金属表面の一部で電位と電流を有限回観測することにより、金属内部の空洞の位置・形状を同定する手法を数学的に定式化したものである。これに対して本研究協力者が取り上げた Lamé system を用いた逆問題は、静弾性変形している線形弾性体の表面の一部で応力と変位を有限回観測したデータを利用して弾性体内部の空洞を同定する手法を想定したものである。

Lamé system は地球や建材のモデルとして広く用いられる等方線形弾性論の基礎方程式系であり、地球物理における地球の内部構造同定問題や材料工学における材料特性の非破壊的同定の問題は Lamé system に対する逆問題として研究されている。ところがこれらの非破壊検査をモデルとした問題の多くは、その数学的定式化において楕円型方程式の初期値問題、あるいは双曲型方程式の時間的曲面に関する初期値問題を解く必要があるため、Hadamard の意味での非適切問題であることが知られている。このため一般には逆問題の解が観測データに関して連続的に依存することが期待できない問題である。このような問題に対して、本研究の主結果は物理的に妥当と考えられる「先験情報」を仮定した場合に空洞同定が変位ベクトル場の境界観測データに連続的に依存することを示し、さらに境界データの変動量を用いて空洞の同定結果の変動量を評価したものである。この条件安定性評価は、現実の観測により得られる観測誤差を含んでいる境界データを用いた場合に空洞の同定結果がどの程度信頼できるかを示すものである。

従来の未知境界同定逆問題の研究では、Laplace 方程式や Helmholtz 方程式など、二階楕円型単独方程式を用いた逆問題設定が主流であり、その代表例として G. Alessandrini らによる金属内部の亀裂・空洞の同定に関する条件安定性評価が挙げられる。この問題の証明において本質的な評価は、ある適当な条件の下で Laplace 方程式に対する初期値問題の解の未知境界上での値を初期条件を用いて評価したものであるが、Lamé system などの楕円型方程式系に対してはこの種の評価が未解決であった。本研究協力者はこの評価の問題に対して Dehman と Robbiano による変数係数 Lamé system の Carleman 評価に基づく検証を行うことにより、Laplace 方程式の初期値問題の解に対する幾つかの評価に類似した評価が Lamé system の解に対しても成立することを示した。それらの評価を利用することにより、弾性体内部の空洞同定逆問題の解の条件安定性評価を示したが、この種の評価は本研究協力者の過去 3 年間の研究の中で初めて示されたものである。

論文

- [1] 三浦 与実, 清水 大輔, 若野 功,
円環領域における Laplace 方程式に対する境界要素解析,
計算数理工学論文集 Vol.2, pp.27-30. (2002 年)
- [2] Higashimori, N. *A conditional stability estimate for determining a cavity in an elastic material*, Proc. Japan Acad. Ser. A **78** (2002), 15-17.

- [3] 若野 功,
二次元曲線亀裂の数学解析と数値解析,
日本応用数理学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp.59-80, (2003 年)

口頭発表

- [1] 東森信就,
「Lamé system を用いた空洞同定逆問題に対する条件安定性評価」
日本数学会 2001 年度秋季総合分科会 (九州大学) 2001 年 10 月.
- [2] 東森信就,
「静弾性場における空洞同定逆問題に対する条件安定性評価」
逆問題・非適切問題の解の再構成と数値解析 (京都大学数理解析研究所研究集会)
2001 年 12 月.
- [3] Higashimori, N.,
“Conditional stability in the determination of an unknown cavity by the Lamé system”
The International Conference on Inverse Problems and Numerics (City University of Hong Kong) 2002 年 1 月.
- [4] 東森信就,
「弾性体内部の空洞同定逆問題に対する条件安定性評価」
日本数学会 2002 年度秋季総合分科会 (島根大学) 2002 年 9 月.
- [5] 東森信就,
“Conditional stability for identifying a cavity in an elastic body”,
逆問題の諸相研究集会 (京都大学数理解析研究所) 2002 年 10 月.
- [6] 東森信就,
「非均質等方弾性体の内部空洞同定逆問題に対する条件安定性評価」
日本数学会 2003 年度年会 (東京大学) 2003 年 3 月.
- [7] 若野 功, 「破壊力学 - とくに 2 次元亀裂問題について -」
日本数学会 2003 年度秋季総合分科会 特別講演 (2003 年 9 月)
- [8] Higashimori, N.,
“Conditional stability of identification of a domain by the Lamé system”,
Workshop “Mathematical Analysis and Numerical Methods for Applied Inverse Problems” (東京大学大学院数理科学研究所) 2004 年 1 月.
- [9] 東森信就,
「弾性体方程式に対するある逆問題について」
日本数学会 2004 年度年会 (筑波大学) 2004 年 3 月.

研究分担課題「精度保証数値計算の非線型問題への適用」

研究分担者： 京都大学大学院理学研究科・教授、西田 孝明

研究内容と成果の概要

本課題研究で設計・実装されている無限多倍長数値計算と区間演算に関連し、数値計算の事後誤差解析の一つの成果である計算機援用解析によって熱対流問題の解析において成果を上げた。

熱対流問題は水平に置かれた流体が、下から一様に熱せられる時の運動の研究であり、浮力の項をのぞいて非圧縮性を仮定した Boussinesq 方程式を用いた近似により Rayleigh 数が臨界値を越えると、一次分岐現象として、roll 状の解、長方形あるいは六角形の cell 状の解が現われることが、既に解析的に示されている。しかしながら、下からの温度が更に高められた時（即ち、Rayleigh 数が、更に増大するとき）は、分岐曲線が延長されることになるが、その解析的な取扱いは未だに出来ていない。この問題に対し、それらの分岐した解の安定性の変化を調べ、二次分岐等を含んだ分岐曲線の大域的な挙動を計算機援用解析して成果を得た。ここでは数値計算のみならず、計算機援用証明法により延長された分岐曲線上の解の構成的な存在証明を行った。殊に、分岐曲線上の二次分岐等を特定する方法を定式化できたので、それを用いて二次定常分岐・二次 Hopf 分岐も検証（証明）しつつある。さらに、水平方向の周期性に摂動を加えた時の解の変化や、それらの安定性の数値解析も行っている。これらの問題は、流体の底面と上の面での境界条件の違いにより、それらの解の安定性が異なることに注意を要する。

さらに Boussinesq 近似が成り立たない一般の圧縮性のある流体に対する熱対流問題の分岐現象の研究も開始した。ここでは非線形双曲性をもつ質量保存則の取り扱いが困難であり、議論のポイントとなっている。

論文

- [1] Takaaki Nishida, Tsutomu Ikeda and Hideaki Yoshihara,
Pattern Formation of Heat Convection Problems,
Proceedings of International Symposium on Mathematical Modeling and Numerical Simulation in Continuum Mechanics, Lecture Notes in Computational Science and Engineering Springer, ed. by T. Miyoshi, 2001, pp.1-10.
- [2] Mitsuhiro Nakao, Yoshitaka Watanabe, Nobito Yamamoto and Takaaki Nishida,
Some Computer Assisted Proofs for Solutions of the Heat Convection Problems,
Reliable Computing, Vol. 9, 2003, pp.359-372.
- [3] Yoshitaka Watanabe, Nobito Yamamoto, Mitsuhiro Nakao and Takaaki Nishida,
A numerical verification of bifurcated solutions for the heat convection problems,
Journal of Mathematical Fluid Mechanics, Vol. 6, 2004, pp. 1-20.

口頭発表

[1] 西田 孝明,

「熱対流方程式系の応用解析」,

日本数学会 平成 16 年度年会 応用数学分科会 特別講演 (2004 年 3 月, 筑波大学)

研究分担課題「脳の数理モデルの解析と逆解析」

研究分担者： 京都大学大学院情報学研究科・講師、久保 雅義

分担者の研究概要

脳の数理モデルの逆問題の基礎研究として、確率微分方程式をりようした新たなモデルを提案すると共に、その有効性を数値シミュレーションを重ねることによって示した。

脳は数百億個にもものばる数多くの神経細胞（ニューロン）から構成される巨大な情報処理器官であり、その複雑なネットワークによって、認知・記憶・思考・言語・感情・意志など、人間にとって最も重要な高次精神機能を司っている。脳研究の特徴として複合領域であるという点にある。脳を理解するためには、研究手法・成果の波及などを見ても、医学のみにとどまるものではなく理学・工学などのあらゆる関連の科学の研究手法を融合して研究を実施する必要がある。現段階では分子・細胞レベルからの研究について、研究成果があげられているが、それらの成果に比して、学際的・融合的に脳機能のメカニズムを明らかにしたという成果が未だない状況と考えている。また、コンピュータなど情報科学の進展は、脳の機能原理を抽出・モデル化を行なうことによって脳の仕組みを解明しようとする計算論的・構成論的研究を可能とした。これによって理論脳科学では、脳の基本構造である神経回路網の学習アルゴリズム・認識モデル・連想モデル等において、物理の統計力学の手法を用いた顕著な業績が上げられている。

これに対して、本分担研究においては、理論脳科学において従来から仮定されてきたこと（神経細胞の性質や大脳皮質の情報処理と学習の原理）についての問題点を明確化し、新しい理論的基盤を構築するために次のような取り組みを行ない、成果を挙げている。神経細胞が情報処理に関与するために主要となる機能を特定し、脳での計算メカニズムを理解するために、単一の神経細胞にたいする独創的な数理的モデルを構築した。このモデルは、数千から数万のイオン・チャネルの相互作用を主体としたイオンによるミクロな電位活動によるマクロな神経細胞としての活動を解明することが目的であり、その結果としてこれまでの生理実験では捉えられていない現象が示された。例えば、脳の情報伝達においては神経細胞間のシナプス結合を介した入出力の相互作用が基本であるが、単一神経細胞における入出力の原理として、それぞれのシナプス結合位置の関係が極めて重要であるということが判明した。これらのことは、これまでのよく用いられている手法（例えば統計力学における平均場近似等）では到達できない結果である。さらにこの成果は、今後の研究展開においては、確率論と力学系による数学解析（確率微分方程式の分岐理論）や大規模な数値計算等による融合的アプローチが研究進展にとって本質的に重要であることを示唆している。

今回の研究は、ナノメートルレベルを考慮した対象とした研究であり、細胞膜上に空間的に分散したイオンチャネルの確率挙動を基礎にした新しい神経細胞モデルをである。数学的には多変数の確率偏微分方程式として定式化を行った。このモデルの数値計算結果からイオンチャネルが確率的挙動を示すことから来るランダムな揺らぎ（ノイズ）が出てくることが示された。更に微弱な外部入力信号にランダムなノイズが加わり確率共鳴が起ることが判明し、神経細胞が信号の検出性能が向上することが示された。入力検出の信頼性

は、膜電位の揺らぎがある適切な範囲にあるときに最大となり、このような神経細胞の集団によって、入力タイミングだけでなく入力電流の大きさも高い信頼性をもって推定できることが分かった。

単一神経細胞レベルの研究だけでなくグローバルな情報処理としてミリメートルレベルの現象を解析するために、上記のような神経細胞モデルを用いて大規模な神経回路を構築した。特徴として局所的な結合構造を持っているために神経回路の活動が時間的なものだけではなく、空間的なダイナミックスをも備えており、非常に複雑で多様な時空間構造を発生させることが挙げられる。この複雑な活動にも関わらず、一つの結合構造から得られた時空間ダイナミックスの時間方向の平均を取ると、ランダムな外部入力を全く異なるものに変えた場合と高い相関を示した。一方で結合構造を変えると、同じ外部入力でも平均的活動に相関は得られなかった。つまり、微細な結合構造がシステムの大域的なダイナミックスに大きな影響を与えていることが判明した。更に初期視覚野の optical recording による実験結果と上述の大規模な神経回路モデルとの比較を行った。生理実験結果は神経細胞の発火は周囲の大域的活動が特定の状態に近づいたときに高い確率で起ること等を示しているが、これらは本モデルにおいても同様の結果が得られることから、このモデルの有効性を確認することが出来た。

上述のような大域的な脳の活動については機能的 MRI や脳磁図などの非侵襲脳機能計測法の技術が格段に進歩し、ヒト脳の機能局在が明らかになりつつある。しかし、脳機能のダイナミックス、すなわち、ミリ秒単位での機能部位の変化や脳内ネットワークの相互の関連性をこれらの手法で調べるにはまだ多くの困難を伴っている。この課題のためには、ミリ秒オーダーの高時間分解能ミリメートルオーダーの高空間分解能を有する新しい脳機能ダイナミックスイメージング法を確立する必要がある。ここでは単なる技術的な改良ではなく、逆問題による理論的な考察から、改めて脳機能ダイナミックスを記述する方程式としてマクスウェル方程式を取り上げモデル化し、数学解析によってこの逆問題に対する一意性があることを示した。

論文

- [1] C. Mehring, U. Hehl, Masayoshi Kubo,
Activity dynamics and propagation of synchronous spiking in locally connected random networks,
Biological Cybernetics, Vol.88, 395-408(2003).
- [2] Masayoshi Kubo, K. Abe, G. Ashida
New technique for analyzing in neural networks,
Neurocomputing, to appear.
- [3] Masayoshi Kubo, C. Mehring, M. Diesmann and U. Hehl
Survival of pulse packets in locally random connected networks,
Neural Computation, to appear.

- [4] Go Ashida, Masayoshi Kubo
Ion channel based description of non-isopotential neuronal membranes,
J. Computatinal Neuroscience, in preperation.

口頭発表

- [1] Masayoshi Kubo,
“Stochastic flow of spike dynamics”,
Dynamic Brain Forum 2002 - Breisach (Germany), Sept. 12-14, 2002 (国際会議招待講演)
- [2] Go Ashida, Masayoshi Kubo,
“Neuronal dynamics based on individual stchastic ion channels”,
9th International Conference on Neural Information Processing, Singapore, Nov. 2002. (国際会議講演)
- [3] Masayoshi Kubo,
“A correlation-based learning at the spike level for an integrate-and-fire model”,
Brain Data Workshop, Oct. 2002

研究分担課題「フラクタル上の非適切問題の数学解析」

研究分担者： 京都大学大学院情報学研究科・教授、木上 淳

研究協力者： 京都大学大学院情報学研究科・助教授、日野 正訓

研究内容と成果の概要

これまでの工学・物理における数値モデルにおいては、空間の滑らかさを前提とした微分方程式が用いられることが多い。しかし一方で、フラクタルアンテナ等で代表されるように、本質的にユークリッド空間とは異なる空間を利用した現象のモデル化や実用技術が提案されつつある。このような背景をもとに、将来のフラクタル上での逆問題解析の基礎研究として、フラクタル空間上での熱あるいははどのような伝播についての研究を行ない、成果を挙げた。

その要点は次の2点であり、前者は研究分担者、後者は研究協力者によるものである。

1 自己相似集合上の熱核の漸近挙動

自己相似集合上の熱核の漸近挙動について研究し、測度が volume doubling property を持つことと熱核の対角成分のある種の漸近評価とが同値であることを示した。また、一般の測度 - 距離空間上のディリクレ形式から定義される熱核に対し、測度の volume doubling property のもとで、exit time の評価と local Nash inequality が熱核のある種の上からの評価と同値であることを示した。一般の resistance form に対して、境界が有限個の点である場合の Green 関数の定義をあたえ、その Green 関数が resistance metric に関して Lipschitz 連続であることを示した。さらに、その Green 関数を用いて速度に値を持つ Laplacian の定義を与えた。

2 保存的拡散半群に対する Varadhan 型評価

無限次元空間上の関数空間についての一般論と保存的拡散半群に対する Varadhan 型評価の研究を行なった。まず前者については、領域上で定義された Sobolev 関数が全体空間に拡張できるかという問題に対し、部分的ながら結果を与えた。また、Riesz の表現定理を無限次元空間の場合に拡張し、その応用として抽象 Wiener 空間上の BV 関数からなる関数空間に対して、Sobolev 空間への埋め込みや、関数の測度値微分の滑らかさについての新たな性質を示した。後者に対しては、一般の有限測度空間上で定義された保存的拡散半群に対し、Varadhan 型の短時間漸近挙動を証明した。これにより、極限が内在距離と用いて表されることを示した。さらにループ群に関して、内在距離の具体的表示を得た。

論文

[1] J. Kigami,

Harmonic analysis for resistance forms,

Journal of Functional Analysis, 204 (2003), 399-444.

[2] J. Kigami,

Local Nash inequality and inhomogeneity of heat kernels,
Proc. London Math. Soc.,(to appear)

口頭発表

- [1] J. Kigami,
“Harmonic analysis for resistance forms”,
Conference of Analysis and Probability on Fractals (2002, Cornell University)
- [2] J. Kigami,
“Harmonic analysis for resistance forms”,
Fractal Geometry and Applications, A Satellite Conference of ICM 2002 (2002, Nanjing University)
- [3] J. Kigami,
“Volume doubling measures and heat kernel estimates on self-similar sets”,
Fractal Geometry and Stochastics III(2003, Friedrichroda)

論文

- [1] M. Hino,
On short time asymptotic behavior of some symmetric diffusions on general state spaces,
Potential Anal., 16 (2002), 249-264
- [2] M. Hino,
On Dirichlet spaces over convex sets in infinite dimensions,
Contemp. Math., 317, 143-156, (2003)
- [3] M. Hino and J. A. Ramirez,
Small-time Gaussian behavior of symmetric diffusion semigroups,
Ann. Probab., 31 (2003), 1254-1295
- [4] M. Hino,
Integral representation of linear functionals on vector lattices and its application to BV functions on Wiener space,
Advanced Studies in Pure Math., 41,(to appear)

口頭発表

- [1] M. Hino,
“A weak version of the extension theorem for infinite dimensional Dirichlet spaces”,
国際研究集会 “Stochastic Analysis and Related fields” (2002年, 京都大学数理解析研究所)

- [2] M. Hino, "Small time Gaussian behavior of symmetric diffusion semigroups", 日本数学会秋季総会 (2002 年, 島根大学)
- [3] M. Hino, "Measure representation of linear functionals on first order Sobolev spaces", 国際研究集会 "Stochastic Analysis in Infinite Dimensional Spaces" (2002 年, 京都大学数理解析研究所)
- [4] 日野 正訓, 「フラクタル図形上のエネルギー測度の特異性について」, 「確率解析とその周辺」 (2003 年, 京都大学)
- [5] 日野 正訓, 「フラクタル上のエネルギー測度の特異性について」, 「ディリクレ形式とマルコフ過程」 (2003 年, 大阪大学基礎工学部シグマホール)

研究分担課題「材料工学に現れる逆問題の解の再構成手法」

研究協力者： 大阪大学大学院工学研究科・教授、久保 司郎

研究内容と成果の概要

材料工学に現れる逆問題の解の再構成手法について、本課題研究の代表者と討論を行ない、研究協力を行なうことで以下の成果を挙げた。

逆問題解析に基礎をおく2次元・3次元き裂の直流電気ポテンシャル測定法として、電気ポテンシャルCT法を拡張して、能動型および受動型電気ポテンシャルCT法に関する検討を行った。すなわち、まず、き裂を有する部材に通電したときの部材の電気ポテンシャル分布を有限要素法や境界要素法により数値解析するとともに、その結果を計測結果と照合し、き裂および欠陥の位置と形状を逆問題的に推定する。さらに、 piezo材料が組み込まれた部材が作用荷重を受ける場合に、外部電流を加えることなく受動的に表れる電気ポテンシャル応答および周辺の電磁場応答を有限要素法により計算し、これを計測結果と照合することにより、部材の中に含まれる欠陥やき裂を同定する手法を構築した。これらの手法の有効性を、数値解析および実験により検証した。

本研究で得られた主な成果は以下の3点である：

- (1) 受動型電気ポテンシャルCT法による板材内部に存在する二次元貫通き裂同定に関して数値解析的および実験的に検討した。まず、二次元貫通き裂が存在すると、その上のpiezoフィルム上の電気ポテンシャル分布には2つの極大値が現れ、極大値の大きさ、位置および間隔からき裂の同定が可能であることを明らかにしている。さらに、piezoフィルム上に現れる電気ポテンシャル分布を測定する実験を行い、実際に測定された計測データからき裂の位置および寸法の推定が可能であることを明らかにした。位置、寸法に加え、傾きが不明であるような二次元斜めき裂の同定が可能であることを明らかにしている。さらに、検査対象内のき裂数が未知であり、き裂間隔が小さく個々のき裂に対するポテンシャル変化が干渉し、ポテンシャルの分布傾向から直接的にき裂数を判別することができない場合に対しても、赤池の情報量基準(AIC)を用いることによりき裂数の推定が可能であり、き裂の位置および形状も推定できることを見いだしている。
- (2) 受動型電気ポテンシャルCT法による三次元表面き裂の同定に関して、検討を行っている。まず、測定面の背面に開口している表面き裂が存在する場合には、特徴的な電気ポテンシャル分布が表れ、そのことに着目したき裂同定手法を構築し、き裂の同定が可能であることを明らかにしている。
- (3) 受動型電気ポテンシャルCT法による、繊維強化コンポジット積層板内の二次元はく離状欠陥の同定を行っている。コンポジット積層板で問題となる層間はく離に対しても、3点曲げ変形を与えることにより、piezoフィルム上に現れる電気ポテンシャル分布から欠陥同定が可能になることを見いだした。

論文

- [1] Daiki SHIOZAWA, Shiro KUBO, and Takahide SAKAGAMI,
Crack Identification by Electric Potential CT Measurement Using Piezoelectric Film

- Installed in Structural Member*,
Proc. of 1st Taiwan-Japan Workshop on Mechanical and Aerospace Engineering,
National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, 2001.12, Vol.1, pp. 207-215..
- [2] Shiro KUBO, Manabu KUCHINISHI, Takahide SAKAGAMI and Seiji IOKA,
Identification of Delamination in Layered Composite Materials by the Electric Potential CT Method,
Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.15, Nos.1-4, 2001/2002, pp.261-267.
- [3] Shiro KUBO, Akira FURUKAWA, and Seiji IOKA,
Alternating Boundary Element Inversion Scheme for Solving Inverse Boundary Value Problem from Noisy Data and Its Regularization,
Inverse Problems in Engineering Mechanics , Proc. Int. Symp. on Inverse Problems in Engineering Mechanics 2001, Nagano, ed. M. Tanaka and G.S. Dulikravich, Elsevier, 2002, pp.77-86.
- [4] 久保司郎,
「逆問題」,
計算力学と社会, 矢川元基編, 2002.1, pp.74-80, 養賢堂
- [5] Daiki SHIOZAWA, Shiro KUBO, and Takahide SAKAGAMI,
Passive Electric Potential CT Method Using Piezoelectric Material for Crack Identification,
Proc. 4th Int. Conf. on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice, paper#072, ed. K.A. Helcio R.B. Orlande, Amer. Soc. Mech. Engrs., Engineering Foundation, 2002.
- [6] 塩沢大輝, 久保司郎, 阪上隆英, 奥野康輔,
「ピエゾ材料を用いた受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂同定に関する実験的検討」,
材料, 51 巻, 8 号, 2002.8, pp.926-931.
- [7] Daiki SHIOZAWA, Shiro KUBO, and Takahide SAKAGAMI,
Passive Electric Potential CT Method Using Piezoelectric Material for Crack Identification,
Proc. of the 4th International Conference on Inverse Problems in Engineering, Editor R.B. Orlande, e-papers, 2002, Vol. I, pp.311-316.
- [8] 久保司郎, 阪上隆英, 塩沢大輝,
「能動型および受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂同定」,
日本 AEM 学会誌, 11 巻, 2 号, 2003.6, pp.73-81.

- [9] Daiki Shiozawa, Shiro Kubo and Takahide Sakagami,
An Experimental Study on Applicability of Passive Electric Potential CT Method to Crack Identification,
Proc. of Int. Conf. on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2003,
Paper #OS09W0285, 2003, pp.1-6.
- [10] Shiro KUBO, and Hirokazu NAMBU,
Estimation of Unknown Boundary Values from Inner Displacement and Strain Measurements and Regularization Using Rank Reduction Method,
Inverse Problems in Engineering Mechanics IV, Proc. Int. Symp. on Inverse Problems in Engineering Mechanics 2003, Nagano, ed. M. Tanaka and G.S. Dulikravich, Elsevier, 2003, pp.75-83.
- [11] Daiki SHIOZAWA, Shiro KUBO, and Takahide SAKAGAMI,
Identification of Delamination Defect in Laminated Composites by Passive Electric Potential CT Method,
Inverse Problems in Engineering Mechanics IV, Proc. Int. Symp. on Inverse Problems in Engineering Mechanics 2003, Nagano, ed. M. Tanaka and G.S. Dulikravich, Elsevier, 2003, pp.195-203.
- [12] Daiki SHIOZAWA, Shiro KUBO, and Takahide SAKAGAMI,
Passive Electric Potential CT Method Using Piezoelectric Material for Crack Identification,
Inverse Problems in Science and Engineering, Vol.12, No.1, 2004.2., pp.71-79
- [13] 久保司郎, 阪上隆英, 塩沢大輝,
「能動型および受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂同定」,
日本 AEM 学会誌, 11 巻, 2 号, 2003.6, pp.73-81.
- [14] 久保司郎,
「8.1 逆問題の異議と逆解析の特性」,
構造工学ハンドブック, 矢川元基編, 2004.3, pp.485-487, 丸善
- [15] 久保司郎,
「8.2 一般的逆解析手法」,
構造工学ハンドブック, 矢川元基編, 2004.3, pp.487-496, 丸善
- [16] 久保司郎,
「8.3.1 非破壊評価に対する逆解析の適用例」,
構造工学ハンドブック, 矢川元基編, 2004.3, pp.496-501, 丸善
- [17] 久保司郎,
「8.3.5 境界値と材料特性同定のための逆解析」,
構造工学ハンドブック, 矢川元基編, 2004.3, pp.518-526, 丸善

論文 (査読なし)

- [1] 塩沢大輝, 久保司郎, 阪上隆英,
「板表面に貼付したピエゾ材膜の電気ポテンシャル CT 計測による板材背面のき裂同定」,
第 45 回日本学術会議材料研究連合講演会講演前刷集, 2001.9, pp.223-224.
- [2] 塩澤大輝, 久保司郎, 阪上隆英,
「試験片表面に貼付したピエゾ薄膜の計測結果を用いた受動型電気ポテンシャル CT 法による裏面き裂の同定」,
日本機械学会第 14 回計算力学講演会講演論文集, No.01-10, 2001.11, pp.197-198.
- [3] 塩澤大輝, 久保司郎, 阪上隆英, 岡崎俊介,
「受動型電気ポテンシャル CT 法による裏面 3 次元き裂の同定に関する実験的検討」,
日本機械学会関西支部第 77 期定時総会講演会講演論文集, No.024-1, 2002.3, pp.2-39
?2-40.
- [4] 楠部寛和, 久保 司郎,
「内部の変位およびひずみ情報を用いた静弾性境界値逆問題の解析とランク低下法による適切化」,
日本機械学会関西支部第 77 期定時総会講演会講演論文集, No.024-1, 2002.3, pp.3-37?3-38.
- [5] 塩沢大輝, 久保司郎, 阪上隆英, 岡崎俊介,
「複合材料におけるはく離欠陥同定に対する受動型電気ポテンシャル CT 法の適用性に関する数値的検討」,
日本材料学会第 51 期通常総会学術講演会講演論文集, 2002.5, pp.43-44.
- [6] 「ピエゾ材料を用いた受動型電気ポテンシャル C T 法」,
日本機械学会 M & M レークサイドサマーシンポジウム講演論文集, No.02-21, 2002.8, pp.97-100.
- [7] 塩沢大輝, 久保司郎, 阪上隆英, 岡崎俊介,, 「受動型電気ポテンシャル CT 計測による複合材はく離欠陥の同定に関する数値的検討」,
第 46 回日本学術会議材料研究連合講演会講演前刷集, 2002.9, pp.299-300.
- [8] 塩沢大輝, 久保司郎, 阪上隆英, 岡崎俊介,
「受動型電気ポテンシャル CT 法による三次元表面き裂の同定に関する実験的検討」,
日本機械学会平成 14 年度材料力学部門講演会講演論文集, No.02-05, 2002.10, pp.497-498.
- [9] 岡崎俊介, 久保司郎, 阪上隆英, 塩沢大輝,
「複合材料におけるはく離欠陥導出に対する受動型電気ポテンシャル C T 法の適用

- 性に関する検討」,
日本機械学会平成14年度材料力学部門講演会講演論文集, No.02-05, 2002.10, pp.357-358.
- [10] 久保司郎,
「逆問題解析の一応用としての受動型電気ポテンシャル CT 法」,
日本機械学会平成14年度材料力学部門講演会講演論文集, No.02-05, 2002.10, pp.27-30.
- [11] 汐月資純, 楠部寛和, 久保司郎,
「領域内変位観測を用いた静弾性境界値逆問題の解析に対するチホノフの適切化法の適用と適切化パラメータの選定」,
日本機械学会第15回計算力学講演会講演論文集, No.02-02, 2002.11, pp.393-340.
- [12] 塩沢大輝, 岡崎俊介, 久保司郎, 阪上隆英,
「ピエゾ材料を用いた受動型電気ポテンシャル CT 法による複合材内はく離状欠陥の同定」,
日本機械学会第15回計算力学講演会講演論文集, No.02-02, 2002.11, pp.411-412.
- [13] 塩澤大輝, 阪上隆英, 久保司郎, 岡崎俊介,
「リアルタイムモニタリングのためのピエゾ材料を用いた受動型電気ポテンシャル CT 法によるき裂同定」,
日本機械学会 第1回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, No.02-53, 2002.12, pp.96-101.
- [14] 塩沢大輝, 久保司郎, 阪上隆英, 高木正彰,
「受動型電気ポテンシャル CT 法による斜めき裂の同定」,
日本材料学会第11回破壊力学シンポジウム講演論文集, 2003.10, pp.75-80.
- [15] 塩沢大輝, 久保司郎, 阪上隆英, 高木正彰,
「受動型電気ポテンシャル CT 法による複数き裂の同定とその破壊力学的評価」,
日本機械学会第16回計算力学講演会講演論文集, No.03-26, 2003.11, pp.645-646.
- [16] 塩沢大輝, 高木正彰, 久保司郎, 阪上隆英,
「受動型電気ポテンシャル CT 法による複数き裂の同定」,
第53回理論応用力学講演会講演論文集, 2004.1, pp.299-300.
- [17] 岡崎俊介, 塩沢大輝, 中谷健作, 久保司郎, 阪上隆英,
「複合材料におけるはく離欠陥同定に対する受動型電気ポテンシャル CT 法の適用性」,
日本機械学会関西支部第79期定時総会講演会講演論文集, No.044-1, 2004.3, pp.8-31-8-32.

- [18] 汐月資純, 久保司郎,
「境界観測および領域内観測を用いた静弾性境界値同定に対する交替境界要素逆解法」,
日本機械学会関西支部第79期定時総会講演会講演論文集, No.044-1, 2004.3, pp.11-25 - 11-26.

口頭発表

- [1] Shiro KUBO, Takahide SAKAGAMI, and Daiki SHIOZAWA,
"Crack Identification from Boundary Measurements",
Int. Conf. on Inverse Problems: Recent Advances in Theories and Numerics,
2002.1.9-12(11), City University of Hong Kong, Hong Kong.
- [2] 久保司郎, 阪上隆英, 塩澤大輝,
「能動型および受動型電気ポテンシャルCT法による非均質・非等方材における欠陥の同定」,
京都大学数理解析研究所 共同研究集会「逆問題の諸相」, 2002.10.15-17(16), 京都・京都大
- [3] 久保司郎, 阪上隆英, 塩澤大輝,
「 piezo材料を用いた受動型電気ポテンシャルCT法」,
日本非破壊検査協会 平成14年度 第2回 電場計測法実用研究会, 2002.11.22, 茨城県土浦・日立建機コンベンションホール
- [4] Shiro KUBO, Takahide SAKAGAMI, and Daiki SHIOZAWA,
"Electric Potential CT Method for Crack Identification: Active and Passive Methods",
Workshop on Electrical Impedance Imaging, 2002.12.16-17(16), Olympic Parktel, Seoul, Korea.
- [5] 久保司郎,
「 piezo材料を用いた受動型電気ポテンシャルCT法によるき裂同定の可能性」,
第8回阿波ワークショップ'03 — 亀高惟倫先生退官記念 —, 2003.8.12-14(14), 徳島・徳島大学工学部
- [6] 久保司郎, 阪上隆英, 塩澤大輝,
「境界上の観測を用いた領域内欠陥および未知境界条件の推定例」,
京都大学数理解析研究所 共同研究集会「逆問題解析の諸相」, 2003.10.20-22(21), 京都大学数理解析研究所
- [7] Shiro KUBO, Takahide SAKAGAMI, and Daiki SHIOZAWA,
"Active and Passive Electric Potential CT Method for Crack Identification",
Workshop "Mathematical Analyses and Numerical Methods for Applied Inverse Problems", 2004.1.19-21(19), 東京・東京大学数理科学研究科

研究分担課題「機械工学に現れる逆問題の解の再構成手法」

研究協力者： 信州大学工学部・教授、 田中 正隆

研究内容と成果の概要

機械工学に現れる逆問題の解の再構成手法について、本課題研究の代表者と討論を行ない、研究協力を行なうことで以下の成果を挙げた。

工学上の実用的に重要な「逆問題」に関する課題を中心に研究を進めてきた。板状試験片の動弾性応答から材料定数を同定する逆問題手法、測定不能な境界条件の同定手法、高速道路防音壁の最適形状推定への新手法の開発が重要な課題であり、下記の研究成果を得ることが出来た。その内容は、大きく次の3点である。

1. 材料定数を同定する逆問題手法の開発

順問題の解析ソフトウェアを用いて、対応する逆問題の解析手法を開発する試みがなされて成功を収めている。著者らはまず、弾性板に衝撃荷重が作用する非定常曲げ振動問題の境界要素解析プログラムを用いて、たわみの計測値から材料定数 (Young 率, 密度) を同定する逆問題の解析手法について考察した。つぎに、ひずみ応答を用いて弾性板の材料定数 (Young 率, 密度) を同定する逆問題の解析手法を詳細に検討した。境界要素解析プログラムによって得られたたわみ及びたわみの値から計算したひずみの値を計測値として用いて、拡張カルマンフィルタの理論に基づき推定すべきパラメータの値を反復計算により順次改良する逆解析手法について考察する。幾つかの例題について数値シミュレーションを行い、ここで提案する逆解析手法の数値的特徴を明らかにした。本手法は任意形状の弾性板で任意の衝撃荷重をうける場合に適用出来る。先験情報をもとにパラメータの概略値を推定する第一段階逆解析とフィルタ理論に基づく第二段階逆解析をてきようすれば、極めてロバストな逆解析が可能である。

2. 境界条件の同定手法の開発

測定が不可能な部分の境界条件を測定可能な部分の測定値を用いて推定する逆問題は、工学上種々の状況で発生しその解決手法の開発が新しい技術開発を創成することが多いので、極めて重要である。本研究は固体の熱弾性変形に着目し、高温作業下で作動するプラント関連機器等の安全性の診断を最終目標に行なった。まず、温度が時間的に変動する非定常熱伝導場の固体の熱弾性変形を高精度に解析する境界要素法ソフトウェアを開発した。次に、これとフィルタ理論を併用して境界条件の同定を行なう逆問題手法を検討した。測定値として温度とひずみに着目し、これらを補助情報として用いる手法を開発した。開発手法をエンジン部品の例題や高温プラントの配管内部の温度や圧力変化の推定などに適用し、解法の有用性を確認した。温度とひずみの測定位置は当然ながら感度の高い適切な場所を選定する必要がある。この手当を的確に行なえば、本解法は解析精度の高いロバストな逆解析手法であることを確認した。解析手法は、2次元及び3次元物体の境界条件の同定に適用できる。

3. 高速道路防音壁の最適形状推定法の開発

音場のトポロジー最適化について、境界要素法と幅広い応用分野をもつセルオートマトン法を適用する方法について検討した。最適化すべき音場の問題は高速道路の防音壁の新しい形状の創成である。道路中心面上に集中音源を想定し、評価点で得られる音圧レベルを下げるような防音壁の形状を推定する手法を開発した。防音壁内に独立(連結していない)部分を導入することで、防音効果の高い形状を推定できる可能性があること、またセルオートマトン法が音場のトポロジー最適化に対して有効であることを数値解析により確認した。具体的な数値シミュレーションは次のように進めた。道路用防音壁の2次元モデルを想定し、水平面に垂直に防音壁が立っているものと仮定する。防音壁の形状を変化させて、いくつかの評価点の音圧絶対値の平均値が小さくなる形状(最適または好適形状)を探索する。その際、独立した部分を含む形状を初期形状とし、そこからセルを1回の解析につき1個増加または削除させて最適形状を推定する遷移則を適用する。騒音低減の測度としては、防音壁から外側に離れた地上に位置する数点での音圧の絶対値の平均値を用いた。初期形状として、独立した形状を含む初期防音壁形状を想定し、数値解析結果より提案手法の有効性を確認した。

論文

- [1] 田中正隆, 松本敏郎, 荒井雄理,
「セルオートマトン法とBEMによる防音壁の最適形状推定」,
日本機械学会論文集, C編, Vol.68, No.676, (2002), pp.3540-3546.
- [2] Masataka Tanaka, Toshiro Matsumoto, Yuri Arai,
Application of BEM and cellular automata to determining optimal shapes of the sound-insulating wall,
Boundary Element Technology XV, ed by C.A. Brebbia and R.E. Dippery, WIT Press, Southampton-Boston, (2003), pp.23-32.
- [3] Masataka Tanaka, Toshiro Matsumoto, Hironori Yamamura,
Application of BEM with extended Kalman filter to parameter identification of an elastic plate under dynamic loading,
Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.28, (2004), pp.213-219.
- [4] Masataka Tanaka, Toshiro Matsumoto, Yuri Arai,
Finding optimal shapes of the sound-insulating wall by means of BEM and cellular automata,
Inverse Problems in Engineering Mechanics VI, Masataka Tanaka (Ed.), Elsevier, (2003), pp.363-373.
- [5] Toshiro Matsumoto, Masataka Tanaka, Tomiki Tsukamoto,
Identifications of source distributions using BEM with dual reciprocity method,

Inverse Problems in Engineering Mechanics VI, Masataka Tanaka (Ed.), Elsevier, (2003), pp.127-135.

- [6] Masataka Tanaka, Artur Guzik,
Analysis of inverse transient thermoelasticity problems by filtration methods,
Inverse Problems in Engineering Mechanics VI, Masataka Tanaka (Ed.), Elsevier,
(2003), pp.65-74.
- [7] Toshiro Matsumoto, Masataka Tanaka, Tomoki Tsukamoto,
Source identification using boundary element method with dual reciprocity method,
Advance in Boundary Element Techniques IV, eds. R. Gallego and M.H. Aliabadi,
University of London, (2003), pp.177-181.
- [8] Masataka Tanaka, Toshiro Matsumoto, Hironori Yamamura,
Parameters identification of an elastic plate subjected to dynamic loading by inverse analysis using BEM and Kalman filter,
Recent Developments in Theories and Numerics, ed. by Yiu-Chung Hon, Masahiro Yamamoto, Jin Cheng and June-Yub Lee, World Scientific, New Jersey-Hong Kong, (2003), pp.384-393.

口頭発表

- [1] 田中正隆, 松本敏郎, 荒井雄理,
「防音壁の最適形状決定へのセルオートマトン法と BEM の適用」,
日本機械学会第 15 回計算力学講演会講演論文集, No.02-2, (2002.11), pp.401-402.
- [2] 松本敏郎, 田中正隆, 塚本智貴,
「二重相反法を用いたソース分布の同定」,
日本機械学会第 15 回計算力学講演会講演論文集, No.02-2, (2002.11), pp.407-408.
- [3] 田中正隆, 松本敏郎, 王彦彬,
「弾性板の衝撃応答を用いるパラメータ同定逆解析 (ひずみ応答を用いる場合)」,
日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集, Vol.I, (2003.8), pp.105-106.
- [4] 松本敏郎, 田中正隆, 塚本智貴,
「二重相反法に基づく境界要素法を用いた点ソースの同定」,
日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集, Vol.I, (2003.8), pp.99-100.
- [5] 田中正隆, 松本敏郎, 荒井雄理,
「BEM とセルオートマトン法による防音壁のトポロジー最適化の試み」,
日本機械学会第 16 回計算力学講演会講演論文集, No.03-26, (2003.11), pp.641-642.

代表的な研究成果

磯 祐介 他	Some Remarks on the Choice of Regularization Parameters under Multiple-Precision Arithmetic	1—7
磯 祐介 他	多倍長計算による非適切問題の数値解析	8—11
磯 祐介 他	64bit計算機環境に適した多倍長数値計算環境の構築と非適切問題の数値計算	12—18
藤原 宏志	High-Accurate Numerical Method for Integral Equations of the First Kind under Multiple-Precision Arithmetic	19—29
今井 仁司	DIRECT NUMERICAL SIMULATIONS OF CAUCHY PROBLEMS FOR THE LAPLACE OPERATOR	30—52
今井 仁司	極座標変換に伴う微分方程式の特異性の回避公式について	53—60
大西 和榮 他	NUMERICAL RECONSTRUCTION OF INTERNAL STATES BY BOUNDARY MEASUREMENTS FOR THE LAPLACE EQUATION	61—73
大西 和榮 他	Direct numerical identification of boundary values in the Laplace equation	74—87
登坂 宣好 他	パラメトリック射影フィルタに基づくアルゴリズムを用いた大型浮遊式海洋建築物模型の損傷同定解析	88—95
西村 直志 他	On the determination of ultrasonic waves emitted from transducers using laser measurements with applications to defect determination problems	96—103
田中 正隆 他	セルオートマトン法とBEMによる防音壁の最適形状推定	104—110
久保 司郎 他	能動型および受動型電気ポテンシャルCT法によるき裂同定	111—119
山本 昌宏 他	One new strategy for a priori choice of regularizing parameters in Tikhonov's regularization	120—127
中村 玄 他	Recovery of the shape of an obstacle and the boundary impedance from the far-field pattern	128—149
田沼 一実 他	DIRECT DETERMINATION OF THE DERIVATIVES OF CONDUCTIVITY AT THE BOUNDARY FROM THE LOCALIZED DIRICHLET TO NEUMANN MAP	150—160
木村 正人 他	A Level Set Method Using the Signed Distance Function	161—192
西田 孝明 他	Some Computer Assisted Proofs for Solutions of the Heat Convection Problems	193—206
若野 功	二次元曲線亀裂の数学解析と数値解析	207—228
久保 雅義 他	New Technique for analyzing stationary global activity in neural networks	229—234
木上 淳	Harmonic analysis for resistance forms	235—280
日野 正訓	On Dirichlet spaces over convex sets in infinite dimensions	281—294